

# Prototypmetoder för hornhögtalare

Linn Andersson och Alice Nivestam

AVDELNINGEN FÖR PRODUKTUTVECKLING | INSTITUTIONEN FÖR  
DESIGNVETENSKAPER | LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA | LUNDS UNIVERSITET  
2022

EXAMENSARBETE



# Prototypmetoder för hornhögtalare

Linn Andersson och Alice Nivestam



**LUNDS**  
UNIVERSITET

# Prototypmetoder för hornhögtalare

Copyright © 2022 Linn Andersson och Alice Nivestam

*Publicerad av*

Institutionen för designvetenskaper  
Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet  
Box 118, 221 00 Lund

Ämne: Produktutveckling (MMKM05)  
Avdelning: Avdelningen för produktutveckling  
Huvudhandledare: Damien Motte  
Bitr. handledare: Delphine Bard  
Examinator: Giorgos Nikoleris

# Abstract

The aim of this project was to investigate suitable prototyping methods to be used during the development of horn loudspeakers. Different methods were tested to investigate how well they replicated the original loudspeaker based on acoustical performance. The methods were also evaluated based on other requirements such as cost, manufacturing process and ability to handle complex shapes.

The method Double Diamond was used to find and evaluate suitable prototyping methods. Two loudspeakers were chosen as references for the prototypes to replicate, one made of plastic and one made of metal. The reason was to investigate if the methods were applicable for loudspeakers made of different materials. Both handmade and additive manufactured prototypes were tested for the horn parts of the loudspeakers. Several surface treatments were also investigated for the different prototypes. In addition to testing prototyping methods for the horn parts, two prototyping methods for the driver mounts of the loudspeakers were tested. The acoustical performance of the prototypes was measured in an echo-free chamber. The frequency response, distortion and directivity of the prototypes were analyzed and compared with the reference loudspeakers. A listening test was also performed for all prototypes.

The handmade prototypes were shown to not replicate the reference loudspeaker and were therefore considered not suitable as prototyping methods. The additive manufactured prototypes replicated the reference loudspeaker made of plastic well. For the loudspeaker made of metal, more differences between the methods were shown. The additive manufactured prototypes did not replicate the reference loudspeaker made of metal as good as they replicated the loudspeaker made of plastic. Surface treatment with metal lacquer showed an improvement for the prototypes of the reference loudspeaker made of metal. For other tested surface treatments, no improvements were shown. To build prototypes of horn loudspeakers made of plastic, FDM in PLA is recommended as prototyping method. To build prototypes of horn loudspeakers made of metal, further research on prototyping methods is recommended. Among the tested methods it was shown that FDM in PA with carbon fiber, surface treated with metal lacquer, is the most suitable method. For the driver mounts of the loudspeakers, MJP was found to be the most suitable method among the tested but further research is recommended to find a more suitable method.

**Keywords:** prototyping, additive manufacturing, horn loudspeakers, acoustics, mechanical engineering

# Sammanfattning

Syftet med detta projekt var att undersöka lämpliga prototypmetoder för utveckling av hornhögtalare. Olika metoder testades för att se vilka som bäst replikerar originalhögtalaren utifrån akustiska egenskaper. Prototypmetoderna utvärderas också utifrån andra krav som kostnad, tillverkningsprocess och förmåga att hantera komplexa former.

För att ta fram och utvärdera lämpliga prototypmetoder användes metoden Double Diamond. Två högtalare valdes som referens för prototyperna att efterlikna, en av plast och en av metall. Detta för att undersöka om metoderna var applicerbara för högtalare av olika material. För högtalarnas horndelar testades både handgjorda och additivt tillverkade prototyper. Flera ytbehandlingar undersöktes också för de olika prototyperna. Förutom prototypmetoder för horndelarna testades också två prototypmetoder för högtalarelementens fäste. De akustiska egenskaperna för prototyperna mättes i ett ekofritt rum. Prototypernas frekvenssvar, distorsion och spridningsmönster analyserades och jämfördes med referenshögtalarna. Ett lyssningstest utfördes också för samtliga prototyper.

Det visades att de handgjorda prototyperna inte efterliknade referenshögtalaren och därför ansågs dessa inte lämpade som prototypmetoder. De additivt tillverkade prototyperna replikerade referenshögtalaren av plast väl. För högtalaren av metall visades större skillnader mellan metoderna. De additivt tillverkade prototyperna efterliknade inte referenshögtalaren av metall lika bra som de efterliknade högtalaren av plast. Ytbehandling med metallack visade förbättring för prototyperna av referenshögtalaren av metall. För övriga testade ytbehandlingar visades inga förbättringar. För att skapa prototyper för högtalare av plast rekommenderas FDM i PLA som metod. För att skapa prototyper för högtalare av metall rekommenderas vidare undersökning av fler prototypmetoder. Av de metoder som testades visades FDM i PA med kolfiber, ytbehandlad med metallack, vara den bäst lämpade metoden. För högtalarelementens fästen visades MJP vara den bäst lämpade metoden bland de testade men vidare undersökning rekommenderas för att hitta en bättre lämpad metod.

**Nyckelord:** prototypframtagning, additiv tillverkning, hornhögtalare, akustik, maskinteknik

# Förord

Detta examensarbete har utförts under våren 2022 som en del av civilingenjörsprogrammet inom maskinteknik vid Lunds Tekniska Högskola. Projektet har genomförts på institutionen för designvetenskaper i samarbete med Axis Communications AB.

Vi vill börja med att tacka vår handledare på Axis Communications, Mikaela Albertsson, för hennes tid, stöd och vägledning genom projektet. Vi vill också tacka medarbetare på Axis Communications som har bidragit med kunskap och erfarenhet inom området.

Ett stort tack till vår huvudhandledare vid Lunds Tekniska Högskola, Damien Motte, som gett oss kontinuerlig återkoppling och värdefulla tips för examensarbetet. Till sist vill vi tacka vår biträdande handledare, Delphine Bard, som har delat med sig av sin kunskap inom akustik och visat intresse för projektet.

Lund, juni 2022

Linn Andersson och Alice Nivestam

# Innehållsförteckning

Akronym- och förkortningslista .....	11
1 Introduktion .....	12
1.1 Bakgrund .....	12
1.2 Syfte.....	12
1.3 Avgränsningar .....	13
1.4 Tidplan.....	13
1.5 Tillvägagångssätt.....	13
1.5.1 Upptäcka.....	13
1.5.2 Definiera .....	13
1.5.3 Utveckla.....	14
1.5.4 Leverera.....	14
1.6 Disposition.....	14
2 Teori .....	15
2.1 Ljud .....	15
2.1.1 Impedans .....	15
2.1.2 Distorsion .....	16
2.2 Hornhögtalare .....	17
2.2.1 Högtalarens komponenter.....	17
2.2.2 Hornets form.....	18
2.2.3 Riktningbestämning .....	18
2.2.4 Aktiva och passiva högtalare .....	19
2.3 Akustikmätning .....	19
2.3.1 Frekvenssvar.....	19
2.3.2 Ljudnivå.....	19
2.3.3 Harmonisk distorsion.....	20

2.3.4	Spridningsmönster .....	20
2.4	Prototypmetoder .....	20
2.4.1	Handgjorda tillverkningsmetoder .....	21
2.4.2	Additiva tillverkningsmetoder .....	21
3	Problemdefinition .....	24
3.1	Upprättande av krav .....	24
3.2	Val av referenshögtalare .....	24
4	Preliminär undersökning av prototypmetoder .....	26
4.1	Kartläggning av prototypmetoder .....	26
4.2	Urval .....	27
4.2.1	Handgjorda tillverkningsmetoder .....	27
4.2.2	Additiva tillverkningsmetoder .....	28
4.2.3	Ytbehandling .....	28
5	Testning av prototypmetoder för horn .....	29
5.1	Prototyp tillverkning .....	29
5.1.1	Gipsbandage .....	29
5.1.2	Lera .....	31
5.1.3	Digital replika .....	32
5.1.4	Material för additiv tillverkning .....	33
5.1.5	Multijet Printing .....	33
5.1.6	Fused Deposition Modeling .....	36
5.1.7	Ytbehandling .....	38
5.1.8	Sammanfattande resultat av prototyp tillverkning .....	41
5.2	Akustikmätning .....	43
5.2.1	Utrustning .....	43
5.2.2	Tillvägagångssätt .....	44
5.2.3	Analys av mätningar .....	44
5.2.4	Lyssningstest .....	45
5.2.5	Preliminära tester .....	45
5.3	Resultat för horn av plast .....	46



5.3.1 Handgjorda prototyper.....	46
5.3.2 Additivt tillverkade prototyper .....	49
5.3.3 Ytbehandling .....	53
5.3.4 Lyssningstest .....	57
5.3.5 Sammanfattande resultat för horn av plast .....	57
5.4 Resultat för horn av metall .....	58
5.4.1 Additivt tillverkade prototyper .....	58
5.4.2 Ytbehandling .....	64
5.4.3 Horndelarnas inverkan.....	71
5.4.4 Lyssningstest .....	72
5.4.5 Sammanfattande resultat för horn av metall.....	73
6 Testning av prototypmetoder för fäste till högtalarelement .....	74
6.1 Prototyp tillverkning.....	74
6.1.1 Multijet Printing .....	75
6.1.2 Fused Deposition Modeling i PLA.....	76
6.2 Akustikmätning .....	77
6.3 Resultat för högtalarelementets fäste av plast .....	78
6.3.1 Frekvenssvar.....	78
6.3.2 THD.....	78
6.3.3 Spridningsmönster.....	79
6.3.4 Lyssningstest .....	81
6.4 Resultat för högtalarelementets fäste av metall.....	81
6.4.1 Frekvenssvar.....	81
6.4.2 THD.....	82
6.4.3 Spridningsmönster.....	83
6.4.4 Lyssningstest .....	84
6.5 Sammanfattande resultat för fäste till högtalarelement .....	85
7 Diskussion .....	86
7.1 Prototyp tillverkning.....	86
7.2 Prototypernas akustiska egenskaper .....	87

7.2.1 Handgjorda prototyper.....	87
7.2.2 Additivt tillverkade prototyper .....	87
7.2.3 Ytornas påverkan på resultatet .....	89
7.2.4 Horndelarnas inverkan.....	90
7.2.5 Samband mellan frekvenssvar och THD .....	90
7.2.6 Spridningsdiagram.....	90
7.2.7 Lyssningstest .....	91
7.2.8 Fäste till högtalarelement .....	91
7.3 Metodik .....	92
7.3.1 Utvecklingsmetodik.....	92
7.3.2 Mätningar .....	92
7.4 Felkällor.....	92
8 Slutsats.....	94
9 Framtida arbete.....	96
Referenslista .....	98
Bilaga A Tidplan .....	101
Bilaga B Högtalare utan baksida .....	104
B.1 Mätresultat .....	104
B.2 Slutsats.....	106
Bilaga C Spridningsmönster.....	107
C.1 Spridningsmönster för horn av plast.....	107
C.1.1 Ytbehandling.....	107
C.2 Spridningsmönster för horn av metall.....	112
C.2.1 Additivt tillverkade prototyper .....	112
C.2.2 Ytbehandling.....	115

# Akronym- och förkortningslista

ABS	akrylnitril-butadien-styren
DI	direktivitetsindex
FDM	Fused Deposition Modeling
MJP	Multijet Printing
PA	polyamid
PLA	polylaktid
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
SPL	ljudnivå (sound pressure level)
THD	total harmonisk distorsion

# 1 Introduktion

*I detta kapitel beskrivs bakgrund till arbetet och arbetets syfte. Vidare presenteras de avgränsningar som gjorts, projektets tidplan, tillvägagångssätt för arbetet och disposition för rapporten.*

## 1.1 Bakgrund

Detta examensarbete har gjorts i samarbete med Axis Communications AB. Axis utvecklar nätverksbaserade säkerhetslösningar och fokuserar främst på lösningar för videoövervakning. Utöver deras många produkter för videoövervakning har de fler produkter inom andra produktområden som utvecklas på avdelningen New Business. På New Business utvecklas produkter för högtalarsystem, intercomsystem och system för åtkomstkontroll. Inom produktområdet högtalarsystem finns idag flera olika högtalare och det är inom detta område som examensarbetet har utförts.

## 1.2 Syfte

Hornhögtalare används i olika applikationer för att riktningsbestämna och förstärka ljud. Hornhögtalare har en komplex formfaktor som påverkar ljudets förstärkning och riktning. För att utveckla horn behöver olika former testas och utvärderas. Detta kan göras genom att använda prototyper för testning. Axis önskar använda sig av snabba prototypmetoder men i dagsläget finns inte tillräcklig kunskap om hur väl dessa återger de avsedda akustiska egenskaperna. Syftet med denna undersökning är därför att testa olika prototypmetoder genom att undersöka hur väl de replikerar de akustiska egenskaperna hos befintliga hornhögtalare. Prototypmetoderna utvärderas också utifrån andra krav som kostnad, tillverkning och förmåga att hantera komplexa former. Detta för att undersöka metodernas relevans för framtida utveckling av hornhögtalare.

## 1.3 Avgränsningar

Avgränsningar har gjorts för att säkerställa en kvalitativ undersökning inom tidsramen för projektet. På grund av begränsad tid och budget avgränsades projektet till att endast använda två högtalare som referens. Av samma anledning begränsades också antalet prototypmetoder som testades. Ytterligare en avgränsning som gjordes var att begränsa antalet mätmetoder som utfördes för respektive prototyp. Ett antal tester för hornhögtalare valdes ut och prioriterades för att jämföras och analyseras.

## 1.4 Tidplan

Arbetet utfördes våren 2022 under en period på 21 veckor. En tidplan gjordes i början av arbetet för att strukturera och få en överblick av vad som skulle göras när. Detta sammanställdes i ett Gantt-schema som presenteras i bilaga A. Under arbetets gång registrerades det faktiska utfallet av när de olika delarna utfördes. Även detta presenteras i bilaga A. Arbetsbelastningen fördelades jämnt mellan studenterna och samtliga delar av arbetet utfördes gemensamt.

## 1.5 Tillvägagångssätt

För att ta fram lämpliga prototypmetoder och utvärdera dessa användes metoden Double Diamond [1]. Metoden innehåller de fyra faserna: upptäcka, definiera, utveckla och leverera. Metoden används som ett verktyg i utvecklingsprocessen för att tillämpa konvergent och divergent tänkande. De fyra faserna presenteras nedan.

### 1.5.1 Upptäcka

Den första fasen, upptäcka, syftar till att förstå problemet genom att samla information från olika källor. Denna fas genomfördes i starten av projektet genom att läsa artiklar och diskutera problemet med personer som arbetar inom utveckling av högtalare. Fasen är divergent och stor mängd information samlades.

### 1.5.2 Definiera

Definitionsfasen är konvergent och innebär att informationen som samlades under föregående steg ska filtreras och sammanställas. Fasen hjälper designern att definiera målen med produkten och utvärdera möjligheterna och begränsningar.

Under denna fas sammanställdes teori och bakgrund för projektet. Mål och krav för prototypmetoderna sattes upp.

### 1.5.3 Utveckla

Fasen utveckla är till för designern att generera koncept och hitta lösningar för det definierade problemet. Fasen är divergent och uppmuntrar till att söka inspiration från olika källor. I denna fas kartlades koncept för olika prototypmetoder och ytbehandlingar för dessa.

### 1.5.4 Leverera

Den sista fasen, leverera, innebär att koncepten testas. Koncepten utvärderas och de som väljs ut förbättras. Processen utförs iterativt. I denna fas gjordes utvärderingar av koncepten utifrån de satta kraven. Koncept valdes ut för att tillverkas och akustiktester utfördes på prototyperna. Baserat på resultaten utvärderades och jämfördes prototyperna på nytt med varandra och de bäst lämpade prototyperna rekommenderades som prototypmetod för utveckling av hornhögtalare. Denna fas utgjorde stor del av arbetet då stort fokus låg på att undersöka och utföra tester av metoderna.

## 1.6 Disposition

Rapporten beskriver processen och resultaten för undersökningen som har gjorts. I kapitel 2, "Teori", beskrivs grundläggande teori som är relevant för arbetets omfattning. Kapitlet innehåller teori om ljud, högtalare, akustikmätningar och prototypmetoder. I kapitel 3, "Problemdefinition", presenteras de krav som satts upp för projektet. Nästa kapitel, "Preliminär undersökning av prototypmetoder", presenterar kartläggning av relevanta prototypmetoder för utveckling av hornhögtalare där dessa utvärderas utifrån de satta kraven och ett första urval av metoderna görs. I kapitel 5, "Testning av prototypmetoder för horn", beskrivs processen för prototyp tillverkning och utförandet av akustikmätningar. Resultatet för akustikmätningarna presenteras också i detta kapitel. Kapitel 6, "Testning av prototypmetoder för fäste till högtalarelement", beskriver vidare undersökning för prototypmetoder av fästen till högtalarelementen. I detta kapitel beskrivs tillverkningsprocessen och resultaten för akustikmätningarna som gjorts för fästena. Diskussion av processen och resultaten förs i kapitel 7, "Diskussion". I detta kapitel diskuteras också metodik och felkällor. I kapitel 8, "Slutsats", dras slutsatser utifrån arbetets resultat. I det sista kapitlet, "Framtida arbete", presenteras förslag på hur det framtida arbetet inom området kan fortskrida.

## 2 Teori

*Detta kapitel beskriver grundläggande teori som är relevant för arbetets omfattning. För att förstå uppbyggnaden och funktionen för hornhögtalare kommer relevanta begrepp inom akustik att beskrivas. Vidare följer en fördjupning inom hornhögtalare och metoder för akustikmätningar förklaras. Olika prototypmetoder med för- och nackdelar presenteras.*

### 2.1 Ljud

Ljud transporteras som mekaniska vågor i form av tryckskillnader. Ljudets volym beror av vågens amplitud och mäts i decibel som är en logaritmisk skala. Det som människor uppfattar som en fördubbling i ljudnivå innebär en ökning på 10 dB. För att öka ljudnivån i en högtalare med 3 dB krävs en fördubbling av effekten in till högtalaren. [2] Frekvens bestäms av ljudets våglängd och hastighet, där hastigheten varierar för olika medier, enligt ekvationen nedan.

$$Frekvens = \frac{Hastighet}{Våglängd}$$

Frekvensen bestämmer tonens höjd. Höga frekvenser har kortare våglängd och låga frekvenser har längre våglängd. Frekvenser som kan uppfattas av människans öra är 20–20 000 Hz [3]. Enligt ekvationen ovan motsvarar detta en våglängd på 16,5–0,0165 m, där ljudets hastighet i luft är 340 m/s [4]. Människors tal sträcker sig inom frekvensintervallet 500–4 000 Hz [5].

Hur ljudvågor reflekteras påverkas bland annat av ytans ojämnheter. En ojämn yta reflekterar olika frekvenser på olika sätt. En frekvens med en våglängd som är liten i förhållande till ytans ojämnheter kommer splittras och reflekteras i flera riktningar. Om våglängden i stället är stor i förhållande kommer större delen av vågen reflekteras i samma vinkel som dess infallsvinkel. [6]

#### 2.1.1 Impedans

Ljud som transporteras i och mellan olika medier påverkas av den specifika akustiska impedansen. Specifik akustisk impedans är en inneboende egenskap hos

material. Denna impedans är beroende av ljudets hastighet i materialet och materialets densitet enligt ekvationen nedan. [7] Luft har låg specifik akustisk impedans jämfört med exempelvis aluminium och glas [8].

$$\text{Specifik akustisk impedans} = \text{Densitet} \cdot \text{Hastighet}$$

Specifik akustisk impedans har också ett nära samband med materialets styvhet. Detta eftersom ljudets hastighet i materialet beror av materialets styvhetsgenskaper [9].

När ljudvågor når ett nytt medium kan vågen reflekteras eller transmittas. För att ljud ska transmittas i det nya mediet behöver mediernas specifika akustiska impedans matcha. Är det stor skillnad i impedans mellan de två medierna minskar effektöverföringen, ljudvågen reflekteras. Impedansmatchning är därför viktigt när ljud ska överföras mellan olika medier. [7]

Akustisk impedans är i stället ett mått på förhållandet mellan ljudvågornas tryck och flöde. Akustisk impedans är likt specifik akustisk impedans men är förutom densitet och hastighet också beroende av arean, se ekvation nedan. [7]

$$\text{Akustisk impedans} = \frac{\text{Densitet} \cdot \text{Hastighet}}{\text{Area}}$$

När ljud transporteras i ett och samma medium är det viktigt att den akustiska impedansen matchar för att ljudvågorna ska överföras effektivt och inte reflekteras. Alltså att det inte finns några hastiga areaförändringar längst ljudets väg. [7]

### 2.1.2 Distorsion

En perfekt ljudvåg följer en sinuskurva. Då ljudvågor propagerar genom medier kan störningar, eller distorsioner, uppkomma. Dessa distorsioner kan vara linjära eller icke-linjära. Linjära distorsioner påverkar inte ljudvågens form men kan ändra dess amplitud eller införa färförskjutning vilket kan leda till att vissa frekvenser spelas upp med högre ljudnivå än andra. Icke-linjära distorsioner ändrar formen på ljudvågen och inför nya frekvenser vilka påverkar ljudets karaktär. Icke-linjära distorsioner kan vara harmoniska eller icke-harmoniska. Harmoniska distorsioner uppträder som övertoner med en frekvens som är en multipel av grundtonens frekvens. Frekvenserna för icke-harmoniska distorsioner är inte multiplar av grundtonen. [10]

I en högtalare innebär distorsion att utsignalen skiljer sig från insignalen. Det är önskvärt att dessa signaler ska vara lika men detta är omöjligt att uppnå i praktiken. [10] I en högtalare kan distorsion uppkomma av olika anledningar. En anledning kan bero på materialet i högtalarens väggar. Ett icke-styvt material kan ge upphov till störningar i form av vibrationer [11].

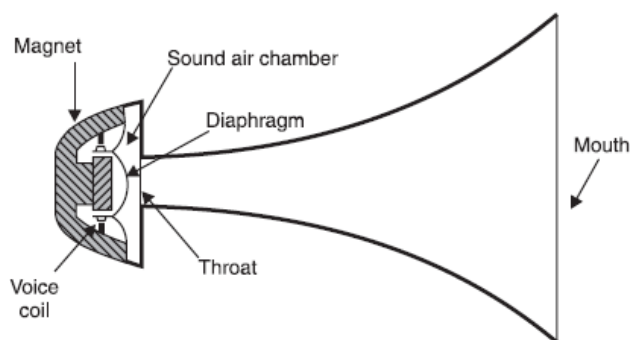


## 2.2 Hornhögaltare

Horn kan användas i högtalare av flera anledningar. Hornets form gör det möjligt att kontrollera och rikta ljudvågornas spridning. Ett horn ökar också den akustiska belastningen på högtalarelementet vilket ökar effektiviteten och gör det möjligt att spela starkare ljud utan att öka effekten till högtalaren. [12]

### 2.2.1 Högtalarens komponenter

De ingående delarna i en hornhögaltare är högtalarelement och horn. Hornet och högtalarelementets komponenter visas i figuren nedan, se figur 2.1. Högtalarelementet består av ett membran som är fäst på en spole. Spolen är placerad i en magnet och när ström går genom spolen induceras ett magnetfält. Magnetfältets styrka och riktning varierar med strömmens storlek och riktning. Detta magnetfält gör att spolen förflyttar sig i magneten. Med spolen rör sig också membranet vilket skapar tryckvågor i luften. [13] I många högtalare finns det en fasplugg mellan membranet och hornet. Faspluggen liknar ett lock med spalter och kan se ut på olika sätt. Spalternas placering gör att ljudvågorna från membranet når hornets ingång vid samma tidpunkt och på så sätt undviks det att höga frekvenser släcker ut varandra [14]. Om ljudvågorna från membranet når hornets ingång vid olika tidpunkter kan destruktiv interferens uppstå. Destruktiv interferens innebär att ljudvågornas amplitud minskar till följd av att flera ljudvågor samverkar med varandra [15].



Figur 2.1 Hornhögaltarens delar [16].

Högtalarelementet kan vara utformad på olika sätt beroende på vilket frekvensintervall det är designad för. Det finns högtalarelement som är designade för låga frekvenser, frekvenser i talintervallet eller höga frekvenser. Det finns även högtalarelement som är designade för hela frekvensintervallet. Nackdelen med sådana är att de oftast inte kan leverera lika bra ljudkvalité för de låga och höga frekvenserna som högtalarelement designade för specifika intervall kan. [17]

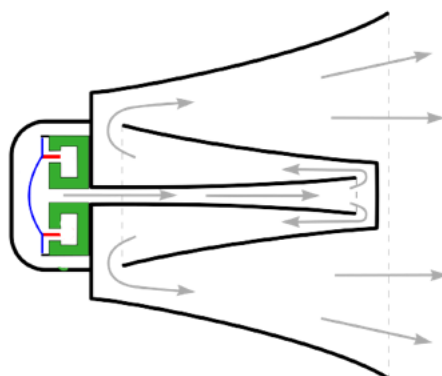
### 2.2.2 Hornets form

Hornet är trattformat med en mindre öppning närmast högtalarelementet och en större öppning mot omgivningen. Den smala delen närmast högtalarelementet kallas för hals och den större öppningen för mun. Hornet kan vara utformat på många olika sätt och kan till exempel följa en exponentiell, parabolisk eller linjär kurva. [12]

Eftersom den specifika akustiska impedansen för ett högtalarelement är större än den för luft sprids ljudvågorna ineffektivt då ett horn inte används. Detta gäller särskilt för de låga frekvenserna eftersom våglängderna är stora i förhållande till högtalarelementets storlek, vilket gör det svårt för högtalarelementet att effektivt överföra ljudvågorna ut i den omgivande luften. Hornets smala hals gör att den akustiska impedansen i luften nära högtalarelementet ökar. När hornet kopplas till högtalarelementet minskar impedansskillnaden mellan högtalarelementet och luften och ljudvågorna kan överföras mer effektivt. [12]

För att ljudvågorna ska spridas i luften på ett effektivt sätt behövs också en jämn övergång mellan halsen och högtalarens omgivning. Detta förklarar formen på högtalarens horn där en stor mun minskar impedansskillnaden mellan munnen och den omgivande luften. Den minskade impedansskillnaden gör att ljudvågorna transmitteras ut i den omgivande luften i stället för att reflekteras tillbaka. [12]

För att få en jämnare övergång utan att förlänga hornets yttermått finns det veckade horn. Dessa har flera horndelar inuti det yttre hornet som utgör och förlänger vägen för ljudvågorna, se figur 2.2. Ett veckat horn minskar impedansskillnaden längs ljudets väg. [12]



Figur 2.2. Veckat horn [18].

### 2.2.3 Rikttningsbestämning

Hornets väggar hjälper till att rikta ljudvågorna så att de sprider sig till ett önskat område. Rikttningsbestämning är viktig då ljudet ska spridas jämnt och ha jämn fördelning för hela frekvensintervallet [12]. Vid en bestämd storlek på hornets mun

är riktningbestämningen sämre för lägre frekvenser än för högre. För att uppnå samma riktningbestämning för låga frekvenser som för höga behöver ett horn med större mun användas. [19] Riktningbestämning gör att högtalarens effektivitet ökar [5].

#### 2.2.4 Aktiva och passiva högtalare

Högtalare kan vara aktiva eller passiva. En aktiv högtalare har en inbyggd förstärkare och en passiv högtalare använder sig av en extern [20]. För att uppnå en jämn ljudnivå på högtalarens utsignal kan filter användas. För aktiva högtalare är det vanligt att filter är inbyggda. De frekvenser med hög ljudnivå dämpas av filtret för att alla frekvenser ska spelas upp med så jämn ljudnivå som möjligt. [21] Eftersom effekten till högtalaren är begränsad är det inte möjligt att öka ljudnivån, vilket är anledningen till att filtret dämpar. En passiv högtalare spelar upp de signaler som skickas in utan att filtrera.

### 2.3 Akustikmätning

För att jämföra och analysera högtalares egenskaper används flera olika mätmetoder. För akustikmätningar finns en standard som specificerar hur mätningar ska utföras, IEC 60268-5 [22]. Enligt denna standard mäts ljudupptagning en meter framför högtalaren och effekten på insignalen är 1 Watt. Mätningar görs bäst i ett ekofritt rum. Ett sådant rum är konstruerat för att absorbera ljudvågor över en viss frekvens. Mätningar kan på så sätt göras utan bakgrundsbuller och utan påverkan av reflektion. [23] Nedan beskrivs några av de mätningarna som utförs för att mäta högtalares akustiska egenskaper enligt tidigare nämnd standard.

#### 2.3.1 Frekvenssvar

Frekvenssvar beskriver ljudnivån från en högtalare vid olika frekvenser. Genom att mäta frekvenssvar upptäcks de frekvenser som uppträder med lägre respektive högre ljudnivå. Det eftersträvas att ha ett jämnt frekvenssvar, alltså att alla frekvenser registreras i samma ljudnivå. Som tidigare nämnt kan dock en helt jämn nivå inte uppnås i praktiken.

#### 2.3.2 Ljudnivå

Ljudnivå (sound pressure level, SPL) är ett mått på ljudvågornas amplitud. Som tidigare nämnt mäts denna nivå i dB. Ljudnivån varierar för olika frekvenser och

presenteras i frekvenssvaret. Nivån kan också presenteras på andra sätt. Ett exempel är att ange medelvärdet på amplituden i ett valt frekvensintervall.

### 2.3.3 Harmonisk distorsion

Total harmonisk distorsion (THD) är ett mått på icke-linjära harmoniska störningar. För att mäta THD mäts ljudtrycket för grundtonen och övertonerna för den aktuella grundtonen. THD anges i procent och beskriver förhållandet mellan ljudtrycket av övertonerna och ljudtrycket av övertonerna och grundtonen tillsammans. Förenklat kan förhållandet förklaras som skillnaden mellan högtalarens in- och utsignal. De procentuella skillnaderna vid varje frekvens presenteras i ett diagram.

### 2.3.4 Spridningsmönster

Spridning beskrivs av ljudnivån i olika vinklar runt högtalaren. Denna kan presenteras i ett spridningsdiagram som visar utvalda frekvenser och dess relativa ljudnivåer i olika vinklar. Den relativa ljudnivån är skillnaden mellan ljudnivån i den aktuella vinkeln och ljudnivån rakt framför högtalarelementets centrum, högtalarens referensaxel. Spridning kan mätas i olika plan, som till exempel horisontellt och vertikalt.

För att beskriva spridning kan direktivindex (DI) och täckningsvinkel anges. DI beskriver hur väl ljudet riktas mot ett bestämt område. Mer specifikt är DI förhållandet mellan ljudnivån rakt framför högtalaren och den genomsnittliga ljudnivån runt högtalaren. Ett högt värde på DI visar en stark riktningbestämning och ett lägre värde på DI innebär att ljudet sprids mer.

Täckningsvinkeln beskrivs som vinkeln mellan de riktningar i vilka ljudnivån är 6dB lägre än ljudnivån rakt framför högtalaren. Att mäta spridningsmönster är särskilt intressant för hornhögtalare då riktningbestämning är en viktig funktion för dessa.

## 2.4 Prototypmetoder

Under utvecklingsfasen av nya produkter är snabb prototypframtagning fördelaktigt då det minskar kostnader och möjliggör en snabbare utvecklingsprocess. En fysisk prototyp ger tydligare känsla för produkten samtidigt som den kan användas för att utföra tester. Det finns många sätt att ta fram prototyper på. Dessa kan baseras på digitala modeller som möjliggör tredimensionella utskrifter men kan också tas fram på traditionella sätt som till exempel av trä, gips eller kartong.

### 2.4.1 Handgjorda tillverkningsmetoder

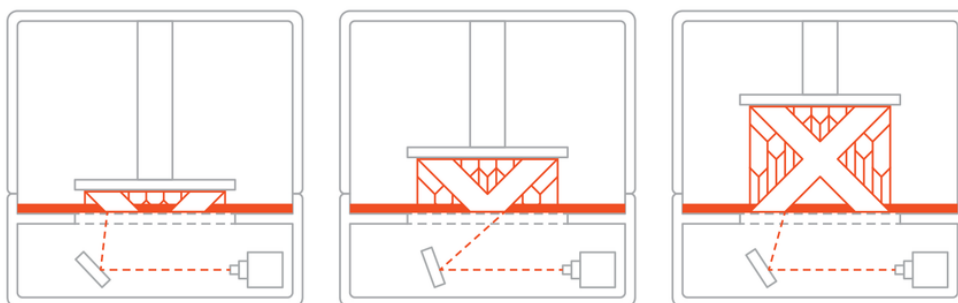
När prototyper byggs för hand kan det vara svårt att tillverka detaljerade och komplexa former. Det kan också vara svårt att bygga prototyper med hög noggrannhet. Fördelar med metoderna är, bland andra, låga kostnader och att ingen digital modell behövs. Handgjorda prototypmetoder kan vara användbara i början av utvecklingsfasen för att få en känsla av produkten och dess storlek. Exempel på handgjorda metoder att bygga prototyper av är kartong, lera, lego, trä och gips. Dessa bygger på grundläggande tekniker och teori för dessa kommer därför inte presenteras.

### 2.4.2 Additiva tillverkningsmetoder

Då digitala modeller används finns det många möjligheter för hur prototypframtagning kan gå till. Resultatet av en tredimensionell utskrift kan variera beroende på tillvägagångssätt och material. De olika metoder som finns tillgängliga gör det möjligt att skriva ut i olika typer av material. Keramik, metall, plast och kolfiber är exempel på detta. Det vanligaste materialet att skriva ut tredimensionella modeller i är olika typer av plast [24]. Nedan presenteras några metoder för additiv tillverkning.

#### 2.4.2.1 Stereolithography

Stereolithography (SLA) är en metod som använder fotopolymer som material för att bygga upp modellen. Byggplattan är nedsänkt i ett bad av fotopolymeren, se figur 2.3. Modellen byggs, lager för lager, genom att laser eller UV-ljus träffar de punkter som motsvarar modellens solida delar. När ett lager är härdat flyttas byggplattan upp motsvarande tjockleken av ett utskriftslager. När detta är gjort upprepas processen tills dess att modellen är färdigbyggd. Det finns också 3D-skrivare som använder SLA där byggplattan och lasern har bytt plats så att modellen i stället byggs nerifrån och upp. [25]



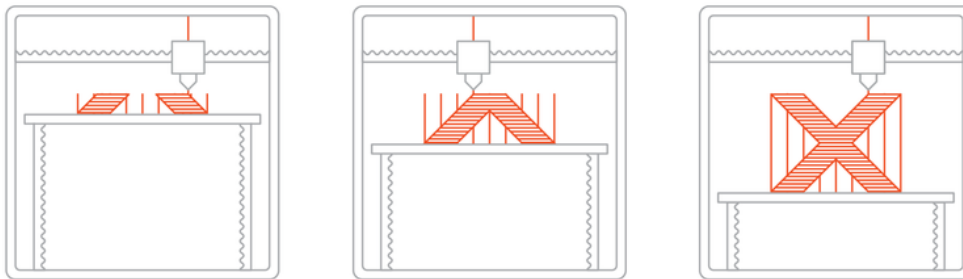
Figur 2.3. Utskriftsprocess för SLA [26].

SLA kräver efterbearbetning i form av fotohärdning och uppvärmning. Detta för att säkerställa bra dimensioner på modellen och för att förbättra modellens mekaniska

egenskaper. En fördel med metoden är att den ger fina ytor och har hög precision. Nackdelar med metoden är att den är relativt långsam, har hög kostnad och är begränsad i val av utskriftsmaterial. [25]

#### 2.4.2.2 Fused Deposition Modeling

För att skriva ut med Fused Deposition Modeling (FDM) används en matare där utskriftsmaterialet, eller filamentet, matas ut. Se figur 2.4. Materialet som används är olika termoplaster. Filamentet värms några grader över dess smältpunkt och extruderas genom ett munstycke och placeras på en byggplatta. Munstycket bygger ett lager på plattan genom att förflyttas i byggplattans plan. När lagret är byggt flyttas byggplattan ner och nästa lager kan påbörjas. Metoden kräver stödmaterial för överhängande detaljer. Detta stödmaterial måste avlägsnas från modellen genom att bryta, tvätta eller lösa upp det. [25]

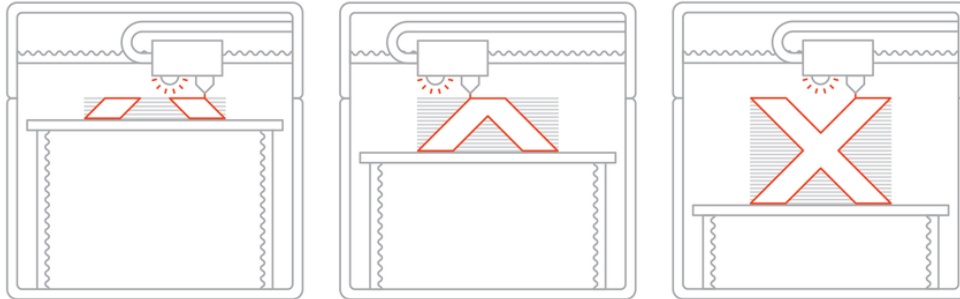


Figur 2.4. Utskriftsprocess för FDM [26].

Fördelar med metoden är att den har en låg kostnad, kan kombinera olika material vid utskrift och att den är snabb. Nackdelar är att metoden ger grov ytjämnhet och att efterbearbetning krävs. Metoden innebär också sämre mekaniska egenskaper hos modellerna. [25] En anledning till sämre mekaniska egenskaper är luft mellan utskriftslagerna. Tunna utskriftslager ger högre styvhet eftersom detta leder till mindre luft mellan lagerna [27].

#### 2.4.2.3 Multijet Printing

Multijet Printing (MJP) är en metod som bygger modeller genom att droppa flytande fotopolymer på byggplattan från flera munstycken, se figur 2.5. För att härda materialet används UV-ljus. Byggplattan sänks stegvis ned för varje nytt lager som har härdats. [28]

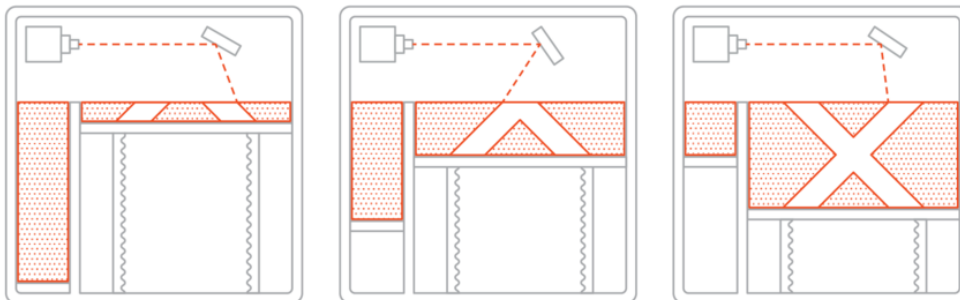


Figur 2.5. Utskriftsprocess för MJP [26].

MJP är fördelaktigt att använda då den ger fin ytjämnhet och hög noggrannhet. Den ger också snabba utskrifter och tillåter att modeller skrivs ut i flera olika material. Även stödmaterialet kan skrivas ut i annat material vilket möjliggör enkel borttagning av detta. Nackdelar är att skrivarna och materialet har relativt hög kostnad, att utskrifterna har dåliga mekaniska egenskaper och att de flesta modeller kräver stödmaterial. [29]

#### 2.4.2.4 Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering (SLS) är en metod som använder pulver som byggmaterial. Pulver rullas ut i ett tunt och jämnt lager på byggplattan, se figur 2.6. Pulverbädden värms upp till en temperatur nära pulvrets smältpunkt. En laser riktas sedan mot de punkter som utgör modellens solida delar. När laser träffar pulvret smälter kornens ytor ihop, också kallat sintring. Processen upprepas till dess att modellen är färdig. Pulvret som inte sintras fungerar som stödmaterial för modellen. Överskottspulvret kan ibland återanvändas för att skapa nya modeller. [25]



Figur 2.6. Utskriftsprocess för SLS [26].

Fördelar med metoden är att olika material kan användas och stödmaterialet är separerat från modellen vilket gör det enkelt att avlägsna. Nackdelar är att metoden har relativt lång utskriftstid, att efterbearbetning krävs och att den kan ge ojämn yta på grund av pulvrets kornstorlek. Då plast värms finns också risk att modellen krymper eller blir skev. [25]

## 3 Problemdefinition

*I detta kapitel presenteras de krav som satts upp för prototypmetoderna. Vidare visas också de valda referenshögtalarna som prototyperna skulle efterlikna och jämföras med.*

### 3.1 Upprättande av krav

Olika krav har tagits fram som prototypmetoderna och prototyperna ska uppfylla. Eftersom prototypmetoderna ska användas i utvecklingsfasen är en billig, lättillgänglig och snabb metod eftersträvarsvärd. Metoden ska vara enkel och kunna nyttjas av hela projektgruppen. För att fylla sitt syfte är det också viktigt att prototypen replikerar de akustiska egenskaperna av den högtalare som senare kommer tillverkas. Metoderna ska också skapa prototyper som är robusta. För att dra slutsatser om akustiska egenskaper behöver också prototypmetoden möjliggöra tillverkning i önskad form. Nedan presenteras samtliga krav.

- Låg tillverkningskostnad
- Lättillgänglig
- Kort tillverkningstid
- Enkel tillverkning och montering
- Replikera akustiska egenskaper av referenshögtalare
- Robust
- Hantera komplexa former

### 3.2 Val av referenshögtalare

Två högtalare valdes som referenser för prototyperna att efterlikna. Tillverkarna av högtalarna som valts har anonymiserats och högtalarna kommer därför benämnas som högtalare 1 och högtalare 2. Högtalarna visas i figur 3.1. Båda högtalarna har en fyrkantig mun men följer olika formkurvor. Hornen som valdes är båda veckade. Högtalare 1 består av tre horndelar. Dessa är ett ytterhorn, en mittendel och en innerdel. Innerdelen är ett konformat rör som är placerat inuti mittendelen.



Högtalare 2 består av två horndelar, ett ytterhorn och en innerdel, där innerdelen består av två sammanfogade rör.



**Figur 3.1.** Till vänster visas högtalare 1 och till höger visas högtalare 2.

Horndelarna för högtalare 1 är tillverkade i akrylnitril-butadien-styren (ABS) med drygt två millimeters vägg tjocklek. Densiteten för ABS ligger i intervallet  $1,03\text{--}1,14\text{ g/cm}^3$  och styvheten för materialet ligger i intervallet  $1\ 550\text{--}2\ 580\text{ MPa}$  [30]. Ytterhornet för högtalare 2 är tillverkad i aluminium och har en vägg tjocklek på en millimeter. Densiteten för aluminium är  $2,7\text{ g/cm}^3$  och materialets styvhetsmodul är  $70\ 000\text{ MPa}$  [8]. Innerdelen för högtalare 2 är tillverkad i ABS. Referenshögtalarna valdes i olika material för att undersöka om prototypmetoderna kan replikera högtalare av olika material.

Högtalare 1 är en passiv mellanhögtalare, med frekvensintervallet  $400\text{--}7\ 000\text{ Hz}$ . Högtalare 2 är i grunden aktiv men testades passivt. Denna högtalare har ett högtalarelement med ett brett frekvensintervall på  $280\text{--}12\ 500\text{ Hz}$ . Att testa prototypmetoder för flera högtalare gjordes för att undersöka om prototypmetoderna är applicerbara för fler typer av hornhögtalare.

## 4 Preliminär undersökning av prototypmetoder

*I detta kapitel presenteras kartläggning av olika prototypmetoder och ett första urval för de olika metoderna görs utifrån de tidigare satta kraven.*

### 4.1 Kartläggning av prototypmetoder

Vid utveckling av hornhögtalare ligger stort fokus på hornets form. Därför undersöktes först prototypmetoder för högtalarens horndelar. Att undersöka prototypmetoder för delarna som fungerar som fäste åt högtalarelementen gjordes i ett senare skede av arbetet och presenteras i kapitel 6.

I denna fas undersöktes en mängd olika metoder för att hitta lämpliga prototypmetoder. För att inkludera många metoder delades de in i kategorier om handgjorda respektive additivt tillverkade prototyper. En tredje kategori var ytbehandlingar som kan förbättra prototyperna. De tre kategorierna med tillhörande metoder presenteras i tabell 4.1.

**Tabell 4.1. Kartläggning av prototypmetoder och ytbehandlingar.**

<i>Handgjorda</i>	<i>Additivt tillverkade</i>	<i>Ytbehandling</i>
Papper	SLS nylon	Spraylack
Frigolit	SLS metall	Finspackel
Kartong	MJP	Aluminiumfolie
Gjuta i gips	SLA	Slipning
Gipsbandage	FDM	Galvanisering
MDF-skiva	Sheet Lamination	
Gjuta i metall	Binder Jetting	
Lera		
Lego		

Prototypmetoderna utvärderades i ett första skede utifrån kostnad, tillgänglighet, robusthet och förmåga att hantera komplexa former. Utifrån denna utvärdering gjordes ett urval. En mer noggrann undersökning gjordes sedan av de kvarvarande metoderna efter att dessa testats utifrån tillverkning och akustiska egenskaper. Denna undersökning presenteras i kapitel 5.

## 4.2 Urval

### 4.2.1 Handgjorda tillverkningsmetoder

Den komplexa formen för hornhögtalare gjorde att flera handgjorda metoder uteslöts då dessa metoder inte var tillräckligt precisa för att återskapa hornets form. Metoderna som uteslöts på grund av detta var lego, frigolit och MDF-skiva. Även omständliga metoder som att gjuta i gips och metall uteslöts eftersom snabb prototyp tillverkning är eftersträvat i utvecklingsprocessen. Vidare krävdes en robust struktur för prototyperna då dessa skulle utsättas för akustiktester vilket gjorde att papper och kartong uteslöts.

Efter detta urval kvarstod lera och gipsbandage som handgjorda prototypmetoder att testa. Lera valdes att testas som prototypmetod då det är ett billigt material, ger en stabil struktur och kan användas för att uppnå komplexa former. Av samma grund valdes gipsbandage att testas som prototypmetod. Även denna metod ger en stabil struktur då den stelnat.

## 4.2.2 Additiva tillverkningsmetoder

För att välja vilka additiva tillverkningsmetoder som skulle testas utvärderas de utifrån kostnad och tillgänglighet. Kostnaderna för de olika prototyperna hämtades internt och från kostnadsförslag av externa leverantörer. Kostnaderna som hämtades internt omfattar materialkostnad och de externa kostnaderna omfattar den totala kostnaden att beställa prototyperna. Dessa kostnader presenteras i tabell 4.2.

**Tabell 4.2. Kostnad för additivt tillverkade prototyper.**

<i>Additiv tillverkning</i>	<i>Kostnad högtalare 1 [SEK]</i>	<i>Kostnad högtalare 2 [SEK]</i>	<i>Leverantör</i>
SLS i nylon [31]	10 980	11 192	LTH
SLS i metall	16 206	22 654	Extern leverantör 1
MJP i fotopolymer	2 359	2 314	Internt
SLA i epoxi	11 000	13 000	Extern leverantör 2
FDM i PLA	86	76	Internt
FDM i PA med kolfiber	976	1 249	Internt

Kostnaderna för SLS och SLA var höga och det bestämdes därför att dessa inte skulle undersökas vidare. Sheet Lamination och Binder Jetting var svårtillgängliga och uteslöts på grund av detta. FDM och MJP fanns tillgängliga på Axis vilket gjorde att kostnaden för att använda dessa för Axis blev låg. Därför valdes dessa metoder att testas och undersökas närmre.

## 4.2.3 Ytbehandling

Spackel, lack, slipning och aluminiumfolie har alla en låg kostnad, är snabba och enkla att använda och testades därför som ytbehandlingsmetoder. Galvanisering uteslöts på grund av att det är en mer komplicerad metod och vanligast använd för metallföremål [32, 33].

## 5 Testning av prototypmetoder för horn

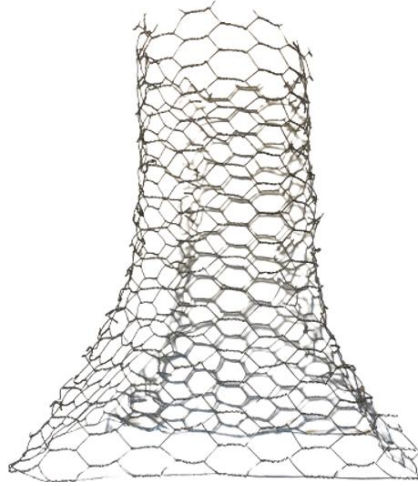
*För att ta reda på vilka prototyper som bäst replikerar högtalaren undersöktes och testades de valda prototypmetoderna. Tillvägagångssätt för tillverkning och testning presenteras. Akustikmätningar gjordes för de tillverkade prototyperna och testresultaten jämfördes och analyserades för att dra slutsatser kring prototypernas egenskaper.*

### 5.1 Prototyp tillverkning

För att underlätta monteringen av prototyper skapades prototyperna för högtalare 1 med en öppning bakom högtalarelementet. Även baksidan på referenshögtalaren sågades bort för att prototyperna och högtalaren skulle efterlikna varandra. Mätningar gjordes för att undersöka om denna ändring hade någon påverkan på högtalarens akustiska egenskaper, se bilaga B. För högtalare 2 gjordes inga ändringar för vare sig högtalaren eller prototyperna. Nedan presenteras tillvägagångssätt för de olika prototypmetoderna.

#### 5.1.1 Gipsbandage

För att återskapa formen av horn delarna användes metallnät. Nätet fungerade som ett skelett för gipsprototypen. Metallnätet formades enligt mätpunkter för att efterlikna formen på högtalaren, se figur 5.1.



**Figur 5.1. Metallnät för tillverkning av gipsprototyp.**

Nätet kläddes med blötlagda gipsbandage på insida och utsida i flera lager för att undvika hål igenom delarnas väggar. I samband med detta fästes metalltråd i nätet för att senare kunna montera prototypdelarna.

Väggarnas tjocklek var cirka två millimeter. Då delarna torkat monterades dessa ihop med högtalarelementet. Vid montering uppstod springor mellan horn och högtalarelement. Dessa springor täcktes igen med hjälp av lera som trycktes på plats. Gipsprototyp gjordes endast för högtalare 1 och resultatet presenteras nedan, se figur 5.2.



**Figur 5.2. Gipsprototyp av högtalare 1.**

Att bygga prototyper med gipsbandage var en omständlig och tidskrävande process. Det var svårt att med metallnätet replikera formen av referenshögtalaren. Vid inklädnad med gipsbandage uppstod många små håligheter i gipsväggarna som var svåra att täcka. Metoden resulterade också i ojämna ytor. Vidare var det komplicerat att montera ihop delarna och fästa dessa på högtalarelementet. Svårigheterna att bygga prototypen gjorde att metoden inte ansågs lämplig som prototypmetod. Därför tillverkades endast en prototyp.

### 5.1.2 Lera

När prototypen byggdes krävdes stöd för att leran skulle hålla sin form innan den stelnade. På samma sätt som för gips gjordes detta stöd med hjälp av metallnät som utgjorde grundformen för hornets delar. Mätpunkter från högtalaren användes som referens vid formning av metallnätet. Nätet kläddes in i ett lager av aluminiumfolie för att undvika att leran fastnade. Leran kavldes ut till längder med en tjocklek på cirka tre millimeter. Längderna placerades på det folieklädda nätet och skarvarna trycktes ihop för att få solida delar. För att kunna fästa högtalarelementet i prototypen användes metalltråd. Tråden sattes dit innan leran stelnat. Då leran stelnat avlägsnades nätet och folie från prototypen. Delarna monterades ihop tillsammans med högtalarelementet. Glipor mellan högtalarelement och horn täcktes igen med lera på samma sätt som för prototypen i gips. Lerprototyp gjordes endast för högtalare 1, se figur 5.3.



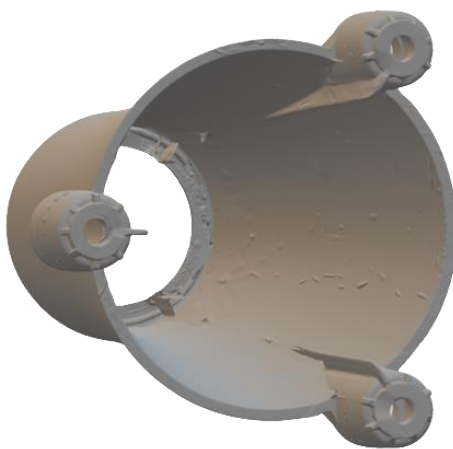
**Figur 5.3. Lerprototyp av högtalare 1.**

Likt gipsprototypen var denna metod omständlig och tidskrävande. Det var också svårt att replikera formen av referenshögtalaren. Ytterligare en svårighet med metoden var att leran stelnade snabbt under tillverkningsprocessen vilket gjorde att prototypen behövde byggas fort. På samma sätt som för gipsprototypen var

lerprototypen svår att montera. Därför ansågs inte heller denna metod lämplig som prototypmetod.

### 5.1.3 Digital replika

För att 3D-printa prototyper av högtalarna krävdes STL-filer. Eftersom högtalarna endast fanns i fysiskt format skapades digitala modeller. För att skapa de digitala modellerna användes 3D-skanning som metod. När ett föremål skannas samlas mätpunkter in som skapar ett punktmoln. Molnet kan sedan användas för att skapa en solid modell eller en yta. Det finns olika tekniker som används för att skanna föremål. En metod är strukturerat ljus. Denna metod skickar ut ljus i ett rutmönster och uppskattar utseendet på objektet beroende på hur mönstret ändrar sig. [34] Skannern som användes för att skanna referenshögtalarna var av modellen GOM Atos III Scan och använder metoden strukturerat ljus. Atos III Scan har två kameror som läser av ytan på föremålet där det strukturerade ljuset träffar. På kort tid kan skannern mäta upp till 16 miljoner punkter, något som möjliggör att även små detaljer kan skannas med hög noggrannhet. [35] För att skannern skulle komma åt alla ytor behövde innerdelen för högtalare 2 delas upp som två fristående delar. Nedan visas resultatet från inskanningen för en av innerdelarna till högtalare 2, se figur 5.4.



**Figur 5.4. Resultat av 3D-skanning för en av innerdelarna till högtalare 2.**

För att göra det möjligt att modifiera delarna i CAD behövde STL-filerna som skapades från inskanningen göras om till STP-filer. Olika programvaror testades för att göra denna konvertering men på grund av många element och håligheter i den inskannade STL-filen kunde inte konverteringen genomföras. I stället gjordes konverteringen manuellt genom att importera STL-filer till Creo Parametric och kalkera inskanningen för att skapa en solid del. Modifieringar gjordes för att sammanfoga innerdelen till högtalare 2 och för att anpassa delarna för de olika utskriftsmetoderna.



#### 5.1.4 Material för additiv tillverkning

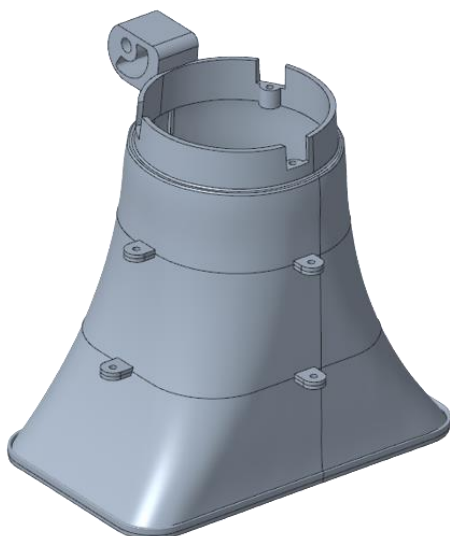
Vid additiv tillverkning av prototyper användes olika material. De material som användes för prototyperna presenteras nedan, se tabell 5.1. I tabellen presenteras materialerna tillsammans med den använda prototypmetoden och materialets densitet och styvhet.

**Tabell 5.1. Materialegenskaper för utskriftsmaterial.**

<i>Material</i>	<i>Tillverkningsmetod</i>	<i>Densitet [g/cm<sup>3</sup>]</i>	<i>Styvhet [MPa]</i>
PLA [36]	FDM	1,24	3 590
Onyx [37]	FDM	1,2	3 000
Kolfiber [37]	FDM	1,4	51 000
VisiJet M2R-WT [38]	MJP	1,16	1 700–2 200

#### 5.1.5 Multijet Printing

Skrivaren som användes för utskrift med MJP var av modellen 3D Systems ProJet MJP 2500. Skrivaren var begränsad i vilka dimensioner den kunde skriva ut vilket gjorde att prototypdelarna behövde skrivas ut i flera delar. För att göra detta gjordes ändringar i STP-filerna. Ytterhornen delades i tre delar för att minska utskriftshöjden. I delningslinjerna på respektive del lades öron med skruvhål till, se figur 5.5. Materialet som användes för utskrift med denna metod var VisiJet M2R-WT. Efter att delarna skrivits ut rengjordes dessa för att avlägsna stödmaterial. Delarna monterades sedan ihop med kontaktlim, skruv och mutter.



**Figur 5.5. CAD-modell av högtalare 1 anpassad för utskrift med MJP.**

Delar utskrivna med MJP som har tunn vägg tjocklek kan enkelt deformeras vid utskrift. Genom att värma upp delarna i varmt vatten kan de formas tillbaka för hand. Vägg tjockleken för högtalare 2 ändrades från en millimeter till två för att möjliggöra utskrift i denna metod utan att riskera att delarna skulle spricka. Utskriftstiden för prototypen av högtalare 2 var 1 dygn och 18 timmar. För prototypen av högtalare 1 var utskriftstiden 1 dygn och 12 timmar. Prototypen för högtalare 1 visas nedan, se figur 5.6.



**Figur 5.6. Prototyp för högtalare 1 tillverkad med MJP.**

Metoden gav prototyper med hög detaljnivå och jämn yta där inga ojämnheter eller lager kunde urskiljas. Formen replikerade referenshögtalaren noggrant. En nackdel med metoden var att prototypen behövde skrivas ut i flera delar och sedan monteras. Montering av ytterhornen var snabb men gav upphov till skarvar med små glipor mellan delarna, se figur 5.7. Eftersom delarna lätt blir skeva var gliporna olika stora på olika ställen. De största gliporna försvann då delarna limmades ihop och trycktes på plats med skruv. Montering av delarna på högtalarelement kunde genomföras utan svårigheter, se figur 5.8.



**Figur 5.7. Skarvar efter montering av ytterhorn för högtalare 2.**



**Figur 5.8. Prototyper monterade på fäste till högtalarelement för högtalare 1.**

### 5.1.6 Fused Deposition Modeling

FDM-skrivarna var inte begränsade för dimensionerna på referenshögtalarna. Därför kunde delarna skrivas ut hela utan att delas. För FDM användes två olika skrivare. Den ena skrev ut med polylaktid (PLA) och den andra skrev ut med Onyx som är en polyamid (PA) med kolfiber.

#### 5.1.6.1 PLA

FDM-skrivaren som användes för utskrift i PLA var av modellen Creality Ender-5 Plus. För högtalaren med ytterhorn av metall, högtalare 2, skrevs prototyper med olika väggjocklekar ut. Detta gjordes för att undersöka om den tunna väggjockleken på aluminiumhornet kan replikeras med olika tjocklekar på utskrivet material. De tjocklekar som testades var en, två och tre millimeter. Olika väggjocklekar testades endast för FDM i PLA eftersom denna metod var den med lägst kostnad.

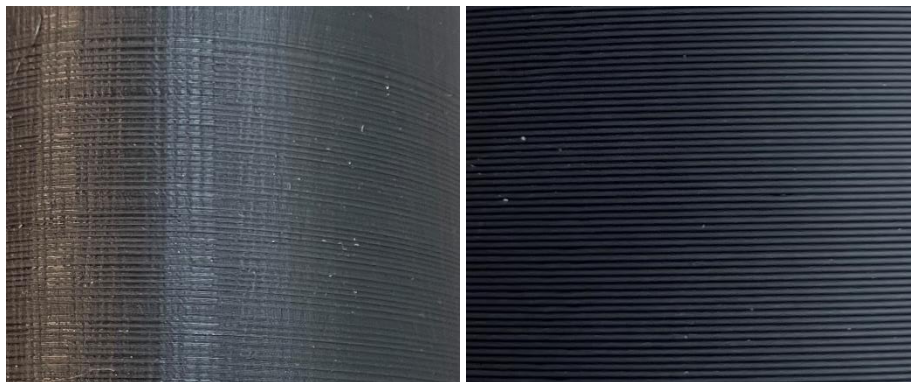
Efter utskrift avlägsnades stödmaterial och prototyperna monterades ihop. Stödmaterialen för prototypen med en millimeters väggjocklek var svårt att avlägsna utan att ha sönder hornet. Därför uteslöts prototypen med denna väggjocklek. Hornen som skrevs ut i två och tre millimeter var enklare att avlägsna stödmaterial från. För andra detaljerade geometrier på hornens innerdelar var det dock svårt att ta bort stödmaterialen. För ytterhornet med två millimeters väggjocklek uppstod sprickor mellan utskriftslagren. Därför skrevs denna prototypdel ut på nytt.

Ytan på detaljerna blev jämn men utskriftslagren kunde tydligt urskiljas. Ytan för denna metod var grövre än ytan för prototyper utskrivna med MJP. Som en del av det iterativa förbättringsarbetet testades också olika höjder på utskriftslagren. Detta gjordes för ytterhornet av högtalare 2 med två millimeters väggjocklek där prototyper skrevs ut med 0,1 och 0,4 millimeters höjd på utskriftslagren. Prototypen med 0,4 millimeters höjd på utskriftslagren hade en utskriftstid på 11 timmar och prototypen med 0,1 millimeters höjd på utskriftslagren hade en utskriftstid på 2 dygn och 8 timmar. Prototypen för högtalare 1 hade en utskriftstid på 14 timmar. En nackdel med denna metod var att delarna ibland lossnade från byggplattan under utskrift vilket gjorde att prototypdelarna behövde skrivas ut på nytt. Nedan visas prototyp för högtalare 2, se figur 5.9.



**Figur 5.9. Prototyp för högtalare 2 tillverkad med FDM i PLA.**

I figuren nedan visas ytan på prototyper med 0,1 och 0,4 millimeters höjd på utskriftslagrena, se figur 5.10. Bilderna visas i samma skala. I bilden kan utskriftslagrena tydligt urskiljas.



**Figur 5.10. Utskriftslager med höjd 0,1 millimeter (till vänster) och 0,4 millimeter (till höger).**

#### *5.1.6.2 PA med kolfiber*

Att printa med kolfiber gjordes som en del i det iterativa arbetet för att se om förbättringar kunde göras. Skrivaren som användes för utskrift i PA med kolfiber var av modellen Markforged X7. Denna testades då skrivaren kan skriva ut styvare detaljer. Eftersom prototypernas vägg tjocklekar var tunna kunde dock inga rena kolfiberlager skrivas ut vilka hade ökat styvheten i prototypdelarna. I stället användes endast PA med små partiklar av kolfiber i. Styvheten i detta material är inte högre än styvheten i PLA men metoden valdes att testas ändå. Utskriftstiden för prototypen av högtalare 2 var 3 dygn och 21 timmar. För prototypen av högtalare 1 var utskriftstiden 3 dygn och 19 timmar. Prototypen för högtalare 1 utskrivet i PA med kolfiber visas nedan, se figur 5.11.



**Figur 5.11. Prototyp för högtalare 1 tillverkad med FDM i PA med kolfiber.**

Prototyperna skrevs ut med 0,1 millimeter höjd på utskriftslagerna vilket gav fin yta. Ytjämnheten kan jämföras med FDM i PLA och MJP där MJP är finast, följt av FDM i PA med kolfiber och sist FDM i PLA. I figur nedan visas ytan på prototypen, se figur 5.12. Figuren visas i samma skala som figur 5.10. Utskriftslagerna är inte lika lätta att urskilja för denna metod jämfört med FDM i PLA vilket tyder på att utskriftslagerna för FDM i PA med kolfiber smält ihop bättre än vad utskriftslagerna för FDM i PLA har gjort.



**Figur 5.12. Utskriftslager med höjd 0,1 millimeter.**

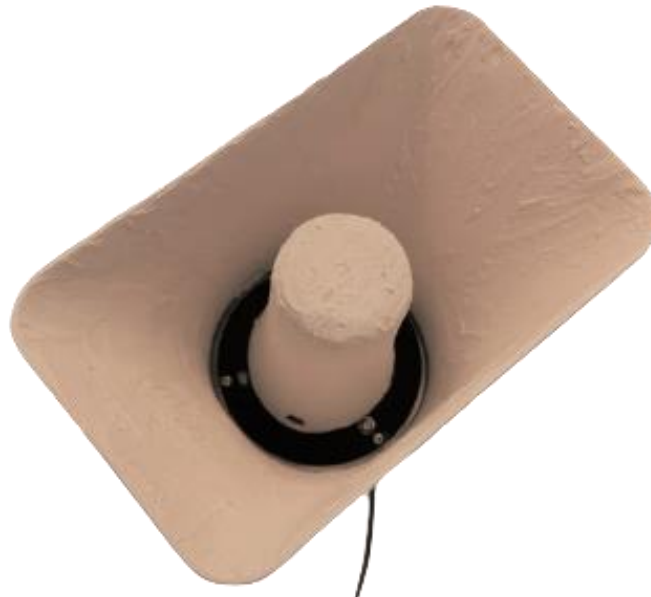
### 5.1.7 Ytbehandling

Olika ytbehandlingar testades för att uppnå jämnare och hårdare yta då detta kan hjälpa ljudvågorna att reflekteras bättre. För prototyper med ojämn yta testades finspackel för att fylla ut ojämnheterna. Det testades också att slipa de spacklade ytorna för att få dessa jämnare. Förutom spackel testades också olika lack för att

göra ytan på prototyperna hårdare. Den sista ytbehandlingen som testades var att klä prototyperna i aluminiumfolie. Kombinationer av olika ytbehandlingar testades också för att hitta en bra lösning.

#### 5.1.7.1 Spackel

Eftersom prototyper tillverkade med FDM i PLA hade mest ojämn yta testades spackel endast för dessa prototyper. Då spackel användes på prototyperna var det svårt att få jämn yta med jämn tjocklek över prototypen. Det var även svårt att komma åt vissa ytor vilket gjorde att endast insidan av ytterhornen och utsidan av innerdelarna spacklades. Bild på spacklad prototyp av högtalare 1 visas nedan, se figur 5.13.



Figur 5.13. Spackel som ytbehandling för prototyp av högtalare 1.

#### 5.1.7.2 Lack

Att lacka prototyperna var en enkel och snabb metod. Klarlack testades för samtliga additivt tillverkade prototyper. Som en del av den iterativa processen testades även metallack, bestående av 99,5 procent aluminium, för att förbättra prototyperna för högtalaren av metall. Vid lackning var det enkelt att komma åt alla ytor för de olika delarna. Detta gällde både för klarlack och för metallack. För att säkerställa att lacket täckte alla ytor ordentligt lackades delarna två gånger. Ytorna för prototyperna som var utskrivna med MJP blev märkbart hårdare efter klar- och metallackning. För prototyperna som var utskrivna med FDM märktes ingen tydlig skillnad på ytorna. Nedan visas resultatet för metallackning av prototyp för högtalare 2 tillverkad med FDM i PA med kolfiber, se figur 5.14.



**Figur 5.14. Metallack som ytbehandling.**

#### *5.1.7.3 Aluminiumfolie*

En annan ytbehandling som testades var att klä prototypen i aluminiumfolie. Detta testades för prototypen med FDM i PLA för högtalaren av metall. För att täcka prototypen klipptes remsor av folie ut som sedan limmades fast på insidan av ytterhornet och på utsidan av hornets innerdel. Insidan av innerdelen kunde inte täckas med folie då dessa ytor var svåråtkomliga. Att klä prototypen i folie var en relativt enkel och snabb process. En utmaning med metoden var att uppnå jämn yta utan att folien veckades. I figur nedan visas den aluminiumklädda prototypen, se figur 5.15. Som syns i bilden blev ytan ojämn.





**Figur 5.15. Ytbehandling med aluminiumfolie.**

### **5.1.8 Sammanfattande resultat av prototyp tillverkning**

En sammanställning av samtliga prototyper som har testats presenteras i tabell 5.2. De handgjorda prototyperna var omständliga och därmed inte lämpade som prototypmetoder. De additiva tillverkningsmetoder som testades uppfyllde de flesta satta kraven. FDM i PLA var den metod med lägst kostnad och kortast tillverkningstid. Gällande kravet för enkel tillverkning och montering var metoderna med FDM bäst. Samtliga additiva tillverkningsmetoder uppfyllde kraven att vara lättillgängliga, tillverka robusta prototyper och hantera komplexa former. Metoden som hanterade komplexa former bäst var MJP. Av de ytbehandlingar som testades var klar- och metallack de enklaste och snabbaste metoderna. Resultaten kommer diskuteras vidare i kapitel 7.

**Tabell 5.2. Sammanställning av testade prototyper.**

<i>Metod</i>	<i>Högtalare 1 (plast)</i>	<i>Högtalare 2 (metall)</i>
Gips	Prototyp 1: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 2 mm</li> </ul>	/
Lera	Prototyp 1: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 3 mm</li> </ul>	/
MJP	Prototyp 1: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 2 mm</li> <li>• Delar hoplimmade och fästa med skruvförband</li> </ul> Prototyp 2: Prototyp 1 med klarlack	Prototyp 1: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 2 mm</li> <li>• Delar hoplimmade och fästa med skruvförband</li> </ul> Prototyp 2: Prototyp 1 med klarlack Prototyp 3: Prototyp 1 med metallack
FDM i PLA	Prototyp 1: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 2 mm</li> <li>• Utskriftslager: 0,4 mm</li> </ul> Prototyp 2: Prototyp 1 med klarlack Prototyp 3: Prototyp 1 med spackel Prototyp 4: Prototyp 1 med spackel och slipning Prototyp 5: Prototyp 1 med spackel, slipning och klarlack	Prototyp 1: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 2 mm</li> <li>• Utskriftslager: 0,4 mm</li> </ul> Prototyp 2: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 2 mm</li> <li>• Utskriftslager: 0,1 mm</li> </ul> Prototyp 3: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 1 mm</li> <li>• Utskriftslager: 0,4 mm</li> </ul> Prototyp 4: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 3 mm</li> <li>• Utskriftslager: 0,4 mm</li> </ul> Prototyp 5: Prototyp 1 med klarlack Prototyp 6: Prototyp 1 med metallack Prototyp 7: Prototyp 1 med spackel Prototyp 8: Prototyp 1 med spackel och slipning Prototyp 9: Prototyp 1 med spackel, slipning och klarlack Prototyp 10: Prototyp 1 med aluminiumfolie
FDM i PA med kolfiber	Prototyp 1: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 2 mm</li> <li>• Utskriftslager: 0,1 mm</li> </ul>	Prototyp 1: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Väggtjocklek: 2 mm</li> <li>• Utskriftslager: 0,1 mm</li> </ul> Prototyp 2: Prototyp 1 med metallack

## 5.2 Akustikmätning

För att undersöka prototypernas akustiska egenskaper utfördes akustikmätningar i ett ljudlabb. Mätningar för frekvenssvar, spridning, ljudnivå och THD utfördes med uppställning enligt nedan, se figur 5.16.



Figur 5.16. Uppställning av mikrofon och högtalare.

### 5.2.1 Utrustning

Mätningarna utfördes i ett ekofritt rum med kapacitet att mäta frekvenser över 200 Hz. Det ekofria rummet följer standarden ISO 3745 där mätningar utförs med 1 dB noggrannhet [39]. För mätningarna användes mikrofon, rotationsställning, förstärkare och program som registrerade ljudupptagningen. Mikrofonen som användes var av modellen GRAS 46AE med ett frekvensintervall på 3,15–20 000 Hz. Rotationsställningen fungerade som ett stativ och kunde rotera 360° med ett önskat vinkelsteg. Ställningen styrdes av programmet Polar Plot Utility som också sammanställde resultat i spridningsdiagram. Förstärkaren var av modellen Samson Servo 200. Mikrofonens ljudupptagning registrerades i programmet Audio Precision som sammanställde och visade resultaten från mätningarna.

### 5.2.2 Tillvägagångssätt

Högtalarens och mikrofonens centrum placerades på samma höjd. Avståndet mellan mikrofonen och högtalarens framkant sattes till 1 meter enligt tidigare nämnd standard, IEC 60268–5. Högtalaren var fäst till rotationsställningen enligt ovan, se figur 5.16. Högtalarelementet kopplades in till förstärkaren. Vid mätning av prototyperna användes samma högtalarelement som för referenshögtalaren. Detta gjordes för att alla tester skulle utföras med lika förutsättningar. För att undersöka hornens akustiska egenskaper utan filtrering testades samtliga högtalare och prototyper passivt.

Frekvenssvaren mättes genom att högtalaren spelade upp ett svep över alla frekvenser mellan 0 och 20 000 Hz. Mikrofonen registrerade ljudvågorna från högtalaren och data presenterades i ett frekvensvarsdiagram. Samtidigt som denna mätning utfördes samlades data in för THD som sammanställdes i ett annat diagram.

För att undersöka riktningsbestämningen i horisontalplanet mättes spridningsmönstret med hjälp av rotationsställningen. Ställningen roterade i små steg om 5° där ett frekvenssvep spelades upp i varje position. Data samlades in för varje svep tills det att högtalaren roterat ett helt varv. Insamlade data presenterades i spridningsdiagram. Frekvenserna som presenteras i diagrammen valdes enligt tidigare nämnd standard till 500, 1 000, 2 000, 4 000 och 8 000 Hz.

### 5.2.3 Analys av mätningar

Resultatet från mätningarna presenterades i diagram. För att analysera diagrammen delades resultatet upp i två delar, en för varje referenshögtalare. I varje del jämfördes resultaten för prototyperna med resultaten för referenshögtalaren. Prototyperna jämfördes också med varandra. Vid jämförelse av diagrammen undersöktes hur väl dessa stämde överens med varandra. För att analysera likheter och skillnader mellan prototyper och referensens jämfördes storleken på skillnaderna för de olika metoderna. Som tidigare nämnt motsvarar 10 dB en upplevelse av fördubbling i ljudnivå vilket ger en tydligare uppfattning om storleken på skillnaderna som visades. För att avgöra om en prototyp är lik referensen var det eftersträfvansvärt att den skulle vara så lik som möjligt för alla mätningar. Vid denna analys är enstaka frekvenser inte lika intressanta som beteenden över större intervall. I mätningar för till exempel frekvenssvar analyserades genomsnittlig ljudnivå över intervallen i stället för variationer i ljudnivå för enstaka frekvenser.

Resultaten analyserades för frekvenser högre än 200 Hz då mätning av lägre frekvenser inte kan garanteras korrekta för det ekofria rummet. Vid analysen togs det också i beaktning att det ekofria rummet mäter med en noggrannhet på 1 dB. Avvikelser av denna storlek ansågs därför inte som en skillnad för de akustiska egenskaperna. Noggrannheten gäller för mätningar av ljudnivån och påverkar

därmed noggrannheten av samtliga mätningar för frekvenssvar, THD, spridning, DI och täckningsvinkel.

#### 5.2.4 Lyssningstest

Förutom de akustikmätningar som gjordes utfördes också lyssningstest. Detta gjordes för att få djupare insikt i hur ljudet påverkas av respektive prototypmetod. Vid testet användes ett ljudspår som skapades innehållande alarmsignaler och intalade meddelanden av olika röster. Prototyperna placerades i det ekofria rummet där varje prototyp spelade upp ljudspåret. Mikrofonen, placerad en meter framför högtalaren, spelade in ljudet och resultatet sparades i en ljudfil med hjälp av programmet Audio Precision. För att enklare kunna jämföra karaktären av ljudet från prototyperna normaliserades ljudfilerna så att dessa hade samma ljudnivå. Normaliseringen gjordes i programmet Audacity. Detta program användes sedan för att lyssna på de olika ljudfilerna parallellt och enkelt kunna byta mellan filerna för att jämföra dessa med varandra. Under lyssningstesterna delades prototyperna in i olika kategorier för de två referenshögtalarna. I varje kategori jämfördes de obehandlade prototyperna med varandra och referensen. Efter detta jämfördes de ytbehandlade prototyperna med motsvarande obehandlad prototyp och referens. Lyssningstestet utfördes av författarna till examensarbetet som under testerna var medvetna om vilken prototyp respektive ljudfil tillhörde. Upplevelsen av ljudkvaliteten på ljudet från de olika prototyperna beskrevs utifrån de skillnader som kunde urskiljas mellan prototyperna och referenserna.

#### 5.2.5 Preliminära tester

Innan mätningar för prototyper av högtalare 1 utfördes testades högtalare 1 med och utan baksida. Mätningarna visade att frekvenssvar och THD var lika för högtalaren med och utan baksida men att små skillnader visades i spridning. Se bilaga B för resultat av mätningar. På grund av likheterna beslutades det att prototyperna kunde mätas utan baksida och för att minska skillnaderna för spridning, mellan referens och prototyper, mättes även referensen utan baksida.

För att undersöka reproducerbarheten för mätningarna som utfördes gjordes ett fåtal av mätningarna vid upprepande tillfällen. Resultaten av dessa visades vara lika varandra. Också reproducerbarheten av de additivt tillverkade prototyperna undersöktes. Prototypen med FDM i PLA, med väggjocklek på två millimeter och 0,4 millimeters höjd på utskriftslager, tillverkades två gånger. Båda prototyperna testades och visade samma resultat av akustikmätningarna. Detta visar att variationerna för prototyperna är små och inte påverkar de akustiska egenskaperna, något som gör metoden tillförlitlig.

## 5.3 Resultat för horn av plast

I detta avsnitt presenteras resultat för de akustikmätningar som har utförts av prototyperna för högtalaren av plast, högtalare 1. I samtliga grafer visas resultatet från referenshögtalaren för att enklare jämföra resultatet för prototyperna. Referenshögtalaren är representerad av den blå kurvan i diagrammen för frekvenssvar och THD.

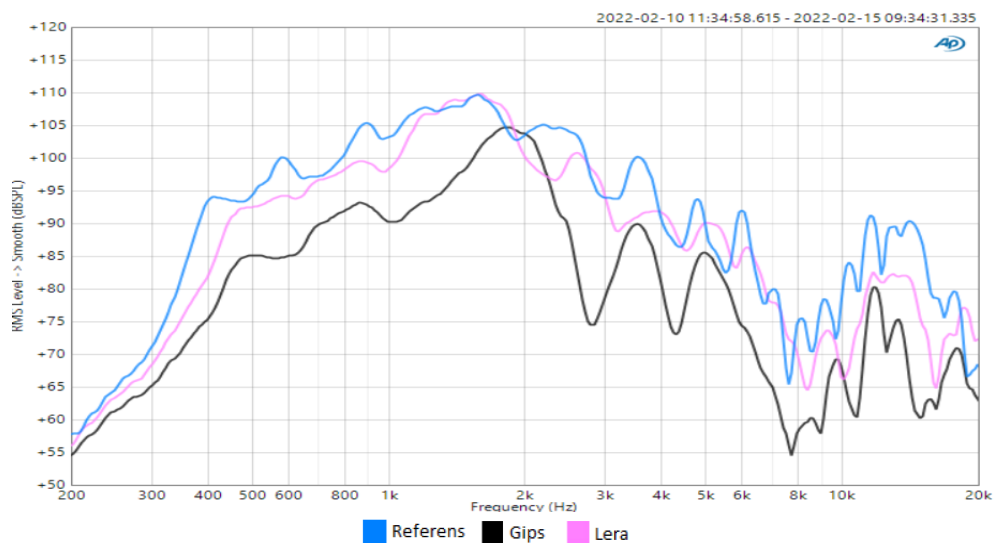
I graferna för frekvenssvar visar y-axeln ljudnivån och x-axeln frekvens och i graferna för THD visar y-axeln andel störningar och x-axeln frekvens. Cirklarna i spridningsdiagrammet markerar den relativa ljudnivån i steg om 5 dB. Varje cirkelsektor i diagrammet markerar ett steg om 15° från högtalarens referensaxel. De färgglada kurvorna beskriver den relativa ljudnivån runt högtalaren för utvalda frekvenser.

### 5.3.1 Handgjorda prototyper

Trots att de handgjorda prototypernas tillverkningsprocess var svår och att formen inte efterliknade referensen gjordes akustikmätningar för att undersöka hur stora avvikelserna för de akustiska egenskaperna var jämfört med de additivt tillverkade prototyperna.

#### 5.3.1.1 Frekvenssvar

I figuren nedan presenteras frekvenssvaret för prototyperna i gips och lera, se figur 5.17. Den svarta kurvan representerar gipsprototypen och den rosa kurvan lerprototypen.

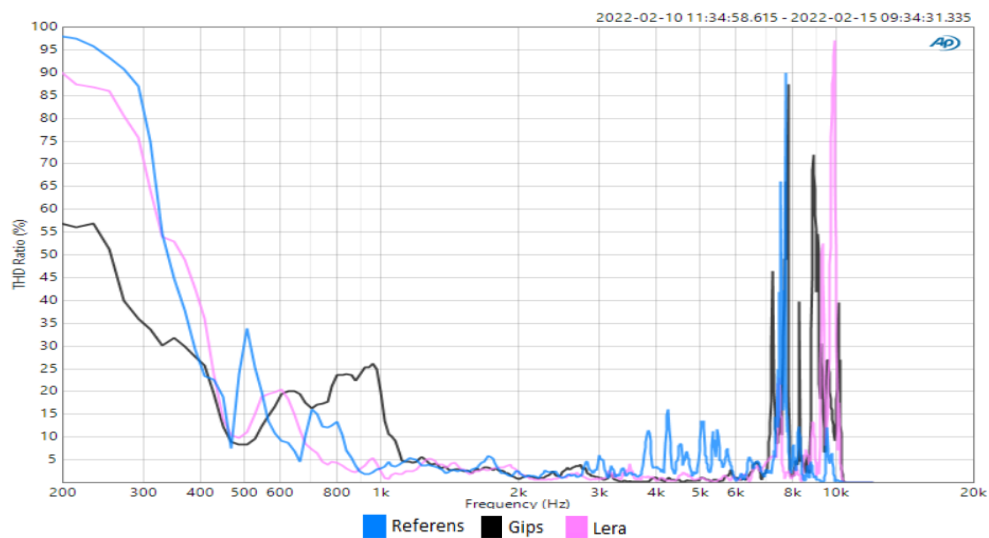


**Figur 5.17. Frekvenssvar för handgjorda prototyper.**

Som syns i frekvenssvaret skiljer sig de handgjorda prototyperna från referensen. Störst skillnad är det mellan gipsprototypen och referensen. Lerprototypen är närmre referensen i ljudnivå än vad gipsprototypen är.

### 5.3.1.2 THD

Nedan presenteras resultatet för THD för de handgjorda prototyperna, se figur 5.18. Likt ovan representerar den svarta kurvan gipsprototypen och den rosa kurvan lerprototypen.

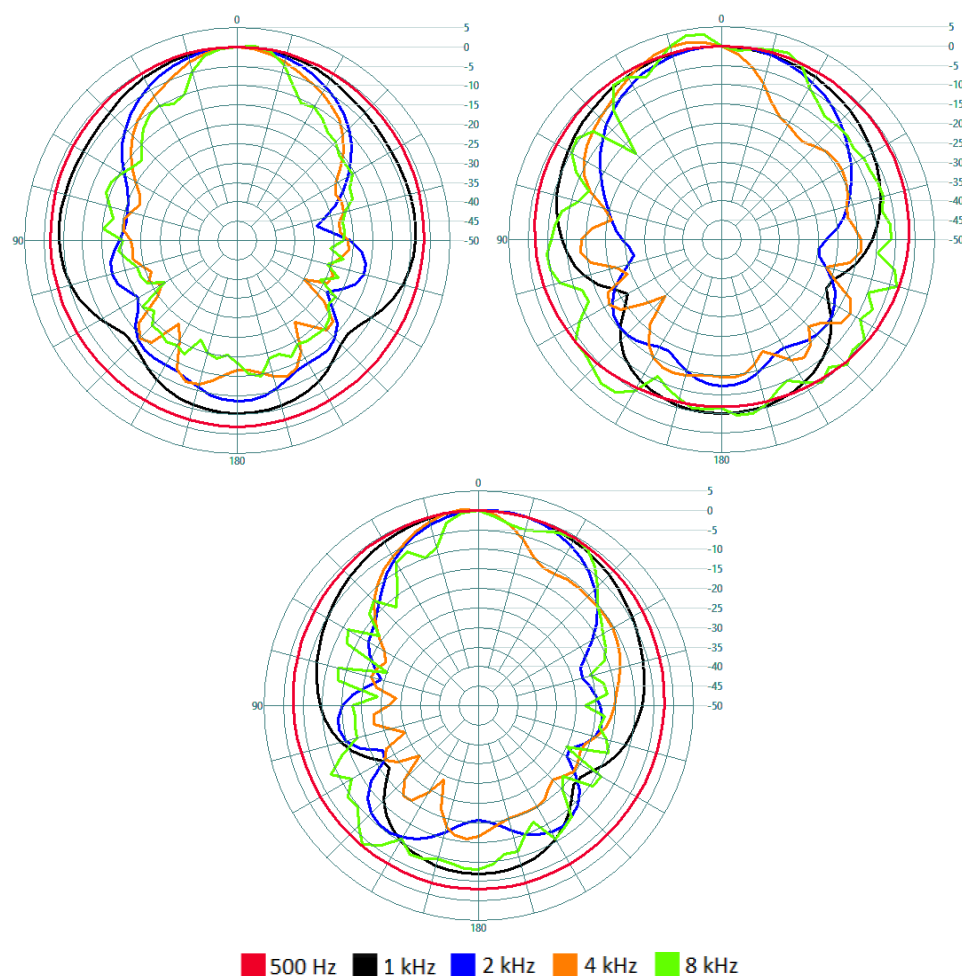


**Figur 5.18. THD för handgjorda prototyper.**

Även för THD skiljer sig prototyperna från referensen. Mellan 1–3 kHz uppmäts låga störningar för referens och prototyper. I intervallet 3–6 kHz har mindre störningar mätts upp för prototyperna jämfört med för referensen. För frekvenser över 7 kHz uppmäts höga nivåer av störningar för både referens och prototyper.

### 5.3.1.3 Spridningsmönster

Nedan presenteras spridningsdiagram för referensen och de handgjorda prototyperna, se figur 5.19.



**Figur 5.19. Spridningsdiagram för handgjorda prototyper. Referensen visas uppe till vänster, gipsprototypen uppe till höger och lerprototypen nere.**

I figur ovan kan det ses att för de högre frekvenserna är den relativ ljudnivå högre för prototyperna än för referensen. De handgjorda prototyperna riktar alltså ljudet sämre jämfört med referensen. Resultatet visar att spridningen för prototyperna är asymmetriskt runt referensaxeln.



Nedan presenteras DI och täckningsvinkel för referensen och de handgjorda prototyperna, se tabell 5.3 och 5.4.

**Tabell 5.3. DI för handgjorda prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,33	3,92	7,29	8,62	9,51
Gips	2,01	4,65	7,14	7,45	3,95
Lera	1,88	4,91	7,53	8,93	7,42

Inget konsekvent mönster för DI visas för de handgjorda prototyperna. Detta överensstämmer med resultatet som visas i spridningsdiagrammen ovan.

**Tabell 5.4. Täckningsvinklar för handgjorda prototyper vid olika frekvenser.**

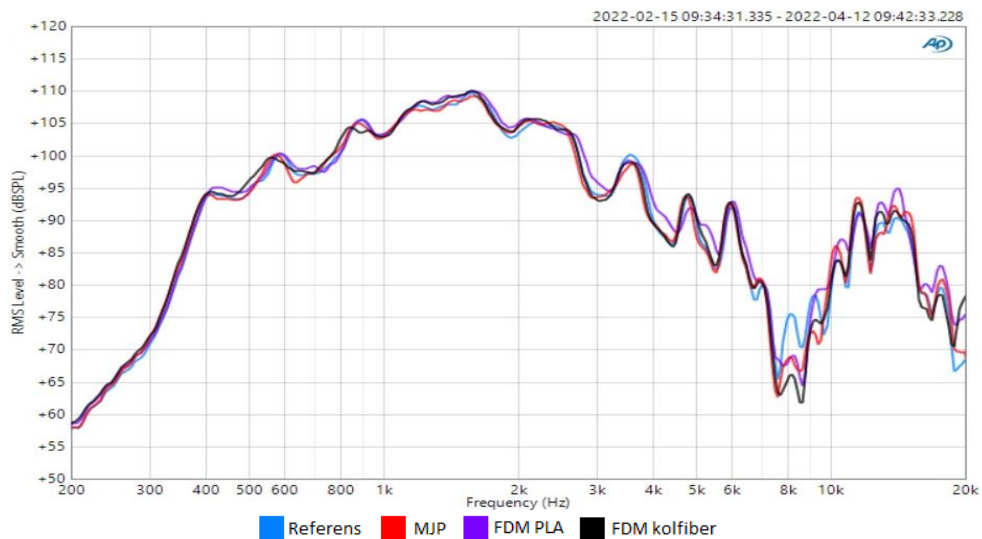
<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	214°	72°	55°	34°
Gips	300°	141°	81°	59°	73°
Lera	360°	138°	69°	45°	57°

Täckningsvinkeln visar liknande ojämna mönster för spridningen.

## 5.3.2 Additivt tillverkade prototyper

### 5.3.2.1 Frekvenssvar

Nedan presenteras resultaten av mätningarna för de additivt tillverkade prototyperna. I figur 5.20 visas frekvenssvar där MJP representeras av den röda kurvan, FDM i PLA av den lila och FDM i PA med kolfiber av den svarta.

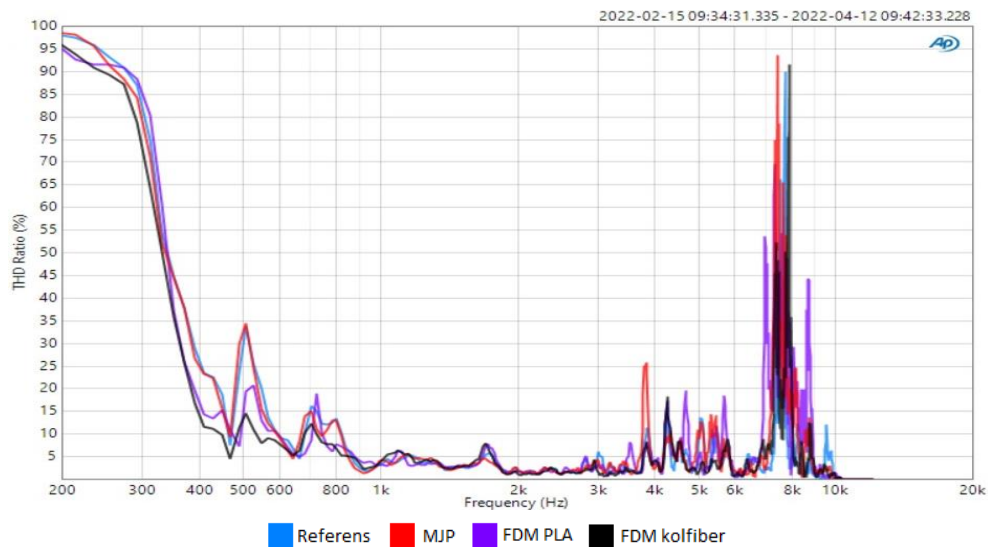


**Figur 5.20. Frekvenssvar för additivt tillverkade prototyper.**

Resultatet visar att frekvenssvaret för prototyperna överensstämmer väl med frekvenssvaret för referenshögtalaren. Resultatet för prototyperna följer samma mönster som referensen och har lika ljudnivå i stora delar av frekvensområdet. En avvikelse kan ses kring 8 kHz, där prototyperna har lägre ljudnivå än referensen. Vid denna frekvens har både referensen och prototyperna en låg ljudnivå vilket kan förklaras med att frekvensen ligger utanför högtalarens frekvensintervall. I resultatet kan ingen tydlig skillnad utläsas mellan de olika prototypmetoderna.

### 5.3.2.2 THD

I figur 5.21 visas resultat för THD för de additivt tillverkade prototyperna. Även i denna figur representeras MJP av den röda kurvan, FDM i PLA av den lila och FDM i PA med kolfiber av den svarta.

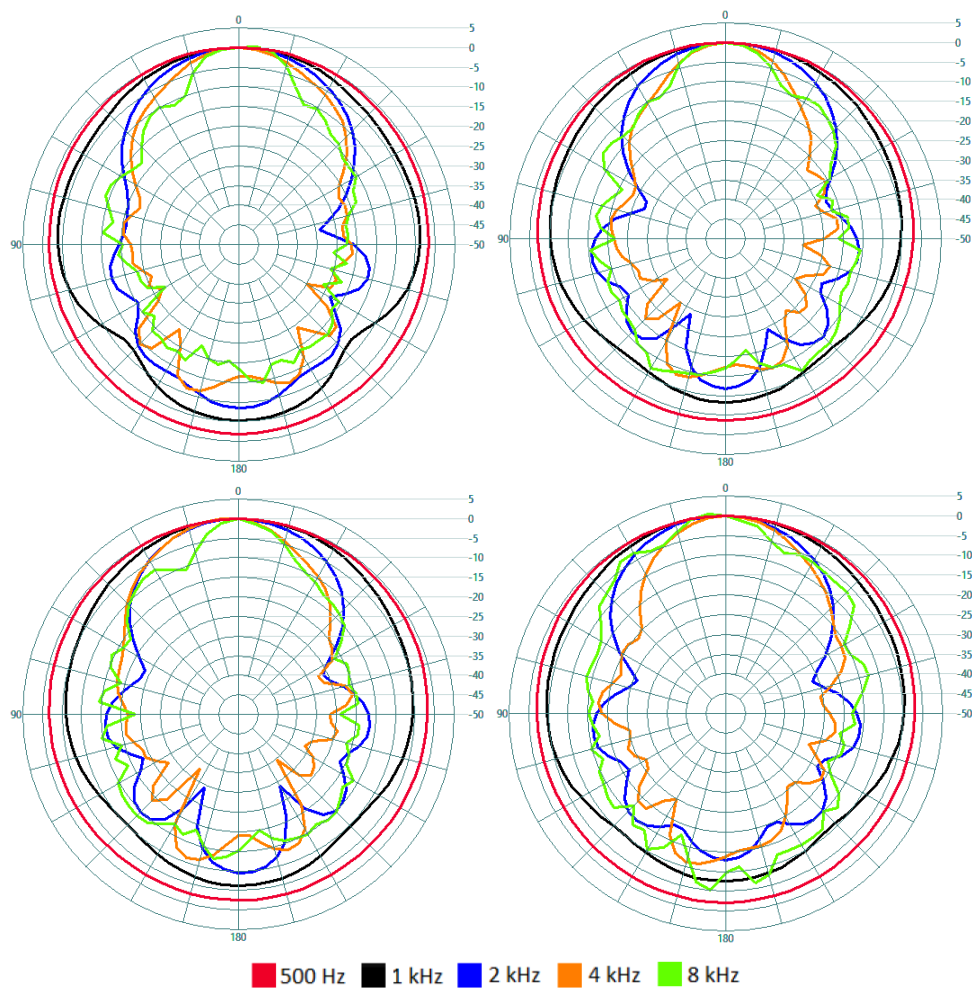


**Figur 5.21. THD för additivt tillverkade prototyper.**

Liksom frekvenssvaret överensstämmer prototypernas resultat för THD väl med resultatet för referensen. För frekvenser över 900 Hz följer kurvorna varandra väl. För lägre frekvenser har FDM i PLA och FDM i PA med kolfiber något lägre andel störningar än vad MJP och referensen har. För frekvenserna runt 8 kHz syns en hög nivå av störningar för både prototyper och referens.

### 5.3.2.3 Spridningsmönster

Nedan presenteras spridningsdiagram för referensen och de additivt tillverkade prototyperna, se figur 5.22.



**Figur 5.22. Spridningsdiagram för additivt tillverkade prototyper. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar prototyp med MJP, nedre vänstra visar prototyp med FDM i PLA och nedre högra visar prototyp med FDM i PA med kolfiber.**

I figur ovan syns inga tydliga skillnader för spridningen för olika frekvenser mellan prototyperna och referensen. Vid frekvensen 8 kHz skiljer sig prototyperna något från referensen då den relativa ljudnivån runt om prototyperna är högre jämfört med referenshögtalaren. Den högsta relativa ljudnivån vid denna frekvens har prototypen med FDM i PA med kolfiber.

Nedan presenteras DI och täckningsvinkel för referensen och de additivt tillverkade prototyperna, se tabell 5.5 och 5.6.

**Tabell 5.5. DI för additivt tillverkade prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,33	3,92	7,29	8,62	9,51
MJP	1,83	4,14	7,83	9,73	9,36
FDM i PLA	1,47	4,19	7,78	8,62	9,8
FDM i PA	1,51	3,94	7,71	8,92	7,5

Data för DI visar att det finns stora likheter för referensen och prototyperna. För prototypen med MJP visas en avvikelse vid 4 kHz där denna har ett högre DI än referensen. Även för FDM i PA vid 8 kHz syns en avvikelse i form av ett lägre DI.

**Tabell 5.6. Täckningsvinklar för additivt tillverkade prototyper vid olika frekvenser.**

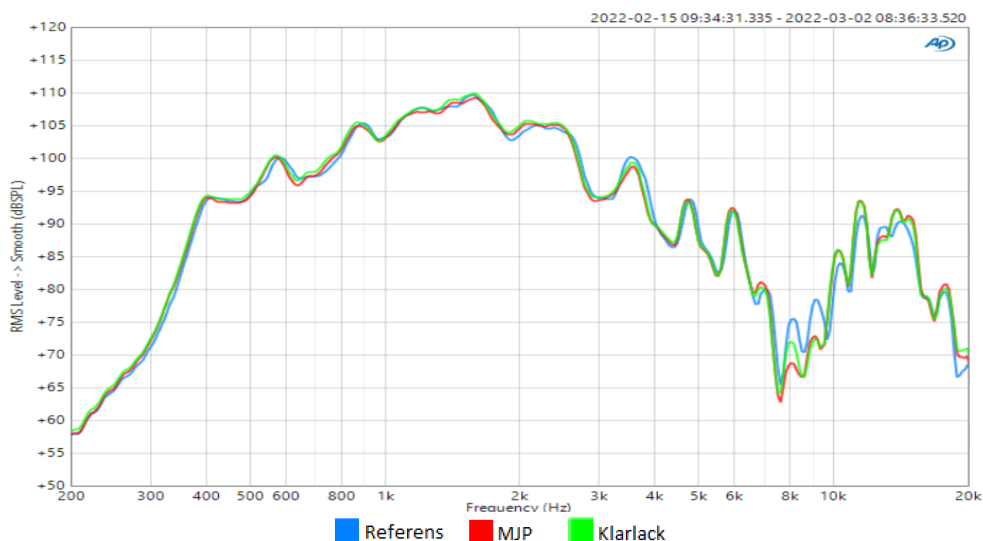
<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	214°	72°	55°	34°
MJP	360°	199°	67°	40°	33°
FDM i PLA	360°	186°	67°	54°	30°
FDM i PA	360°	211°	70°	50°	57°

Likt data för DI visar data för täckningsvinkel liknande resultat, att prototyperna liknar referensen. Även här visas avvikelser för MJP vid 4 kHz och för FDM i PA vid 8 kHz. Täckningsvinklarna för de olika prototyperna vid 1 kHz skiljer sig något från varandra.

### 5.3.3 Ytbehandling

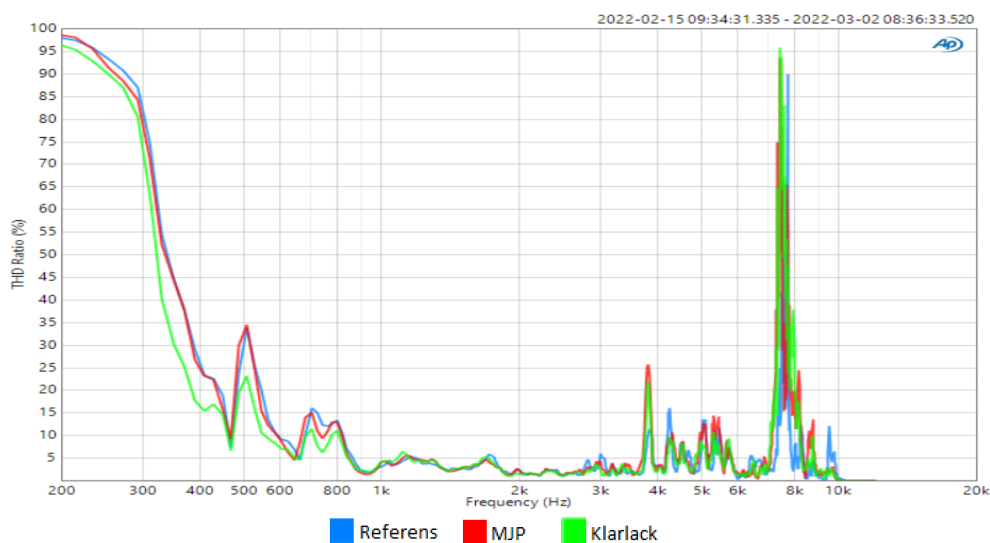
#### 5.3.3.1 Lack

I figur 5.23 och 5.24 presenteras resultatet för mätning av klarlackad prototyp med MJP. Den första figuren visar frekvenssvaret och den senare THD. Den röda kurvan representerar den obehandlade MJP-prototypen och den gröna representerar den klarlackade.



**Figur 5.23. Frekvenssvar för klarlackad prototyp med MJP.**

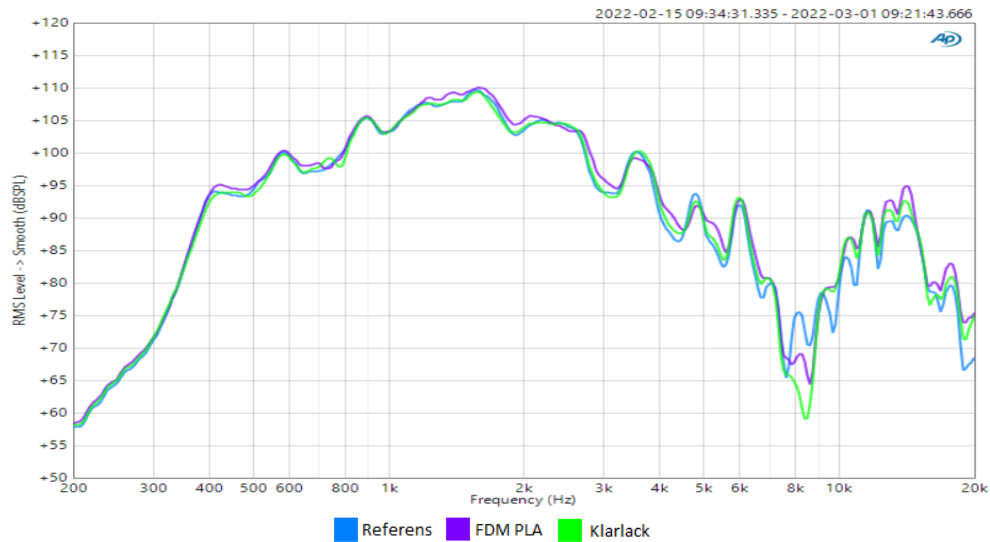
Som visas i figur ovan har frekvenssvaret för den klarlackade prototypen samma beteende som frekvenssvaret för den obehandlade. En liten avvikelse kan ses vid 8 kHz. Resultatet visar att klarlack inte har någon påverkan på resultatet för frekvenssvar.



**Figur 5.24. THD för klarlackad prototyp med MJP.**

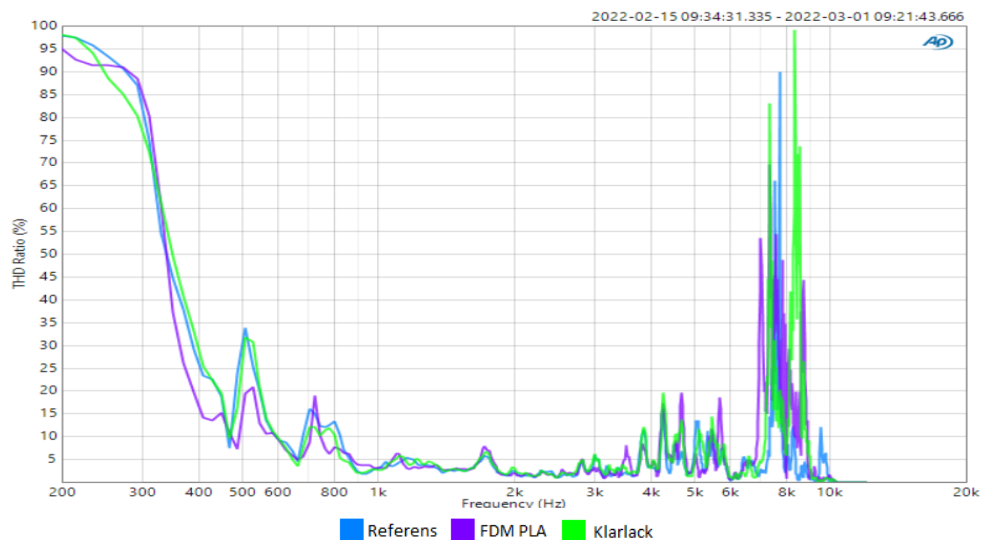
Likt resultatet för frekvenssvar följer kurvan för THD för den klarlackade prototypen kurvan för den obehandlade MJP-prototypen väl. För frekvenser under 800 Hz syns det dock att den klarlackade prototypen visar något mindre störningar än både referensen och den obehandlade prototypen.

I figur 5.25 visas frekvenssvaret för klarlackning av FDM i PLA. Även här representerar den gröna kurvan den klarlackade prototypen. Den lila kurvan representerar FDM i PLA.



**Figur 5.25. Frekvenssvar för klarlackad prototyp med FDM i PLA.**

Resultatet av frekvenssvar för klarlackning av FDM i PLA visas vara likt resultatet för referensen. Även för FDM i PLA finns en avvikelse vid 8 kHz. Att klarlacka FDM i PLA visas ha en liten påverkan på frekvenssvaret då den lackade är något närmre referensen än vad den obehandlade är. Nedan visas resultatet för THD av den klarlackade prototypen med FDM i PLA, se figur 5.26.



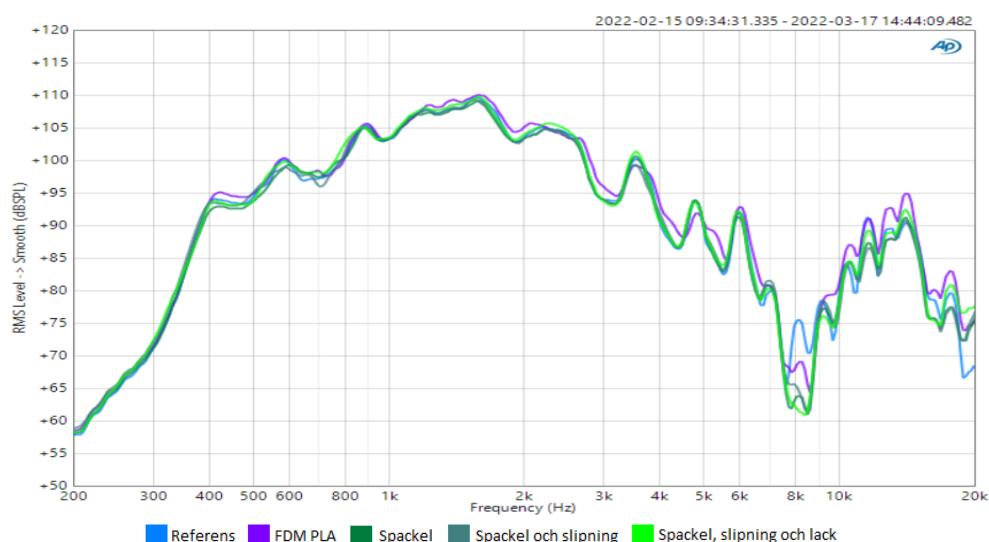
**Figur 5.26. THD för klarlackad prototyp med FDM i PLA.**

Resultatet för THD för den klarlackade prototypen överensstämmer väl med resultatet för referensen. För frekvenser under 1 kHz visas det att den klarlackade prototypen efterliknar referensen bättre än vad den obehandlade gör.

Spridningsdiagram, DI och täckningsvinklar för de lackade prototyperna med MJP och FDM i PLA presenteras i avsnitt C.1.1.1 i bilaga C. Spridningsmönster för den klarlackade prototypen med MJP visade ingen tydlig skillnad jämfört med spridningsmönstret för den obehandlade prototypen. För prototypen med FDM i PLA visades på samma sätt ingen större skillnad. Ett undantag för denna prototyp var för frekvensen 8 kHz. Vid denna frekvens är rikttningsbestämningen för den lackade prototypen sämre än för den obehandlade och skiljer sig därmed mer från referensen.

### 5.3.3.2 Spackel

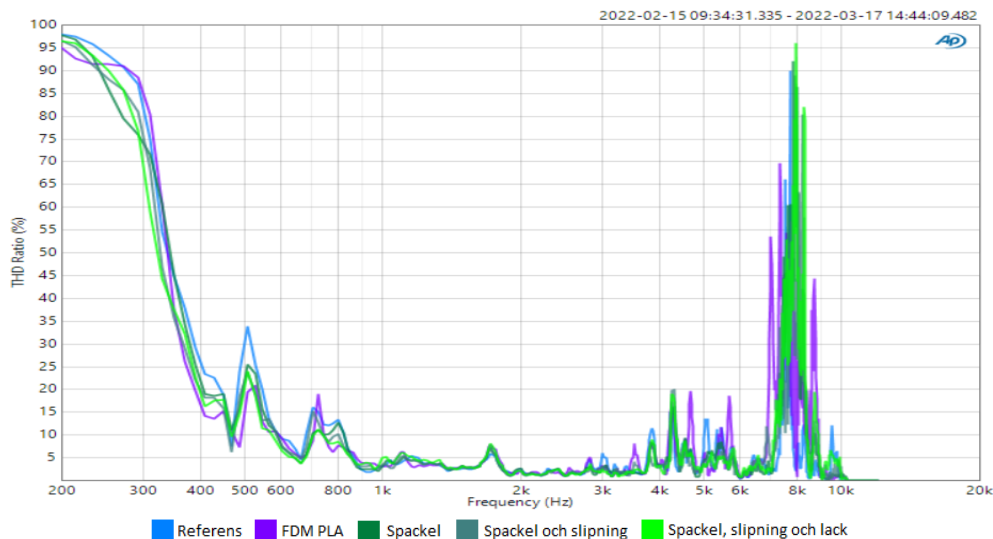
Nedan presenteras frekvenssvaret för prototyper med FDM i PLA ytbehandlade med spackel, se figur 5.27. Den lila kurvan representerar den obehandlade prototypen, den mörkgröna kurvan representerar den spacklade prototypen, den turkosa representerar den spacklade och slipade prototypen och den ljusgröna den spacklade, slipade och lackade prototypen.



**Figur 5.27. Frekvenssvar för ytbehandling med spackel av prototyper med FDM i PLA.**

Samtliga ytbehandling har liknande karaktär som både den obehandlade prototypen och referenshögtalaren. Det visas att den obehandlade prototypen skiljer sig aningen mer från referensen än vad de ytbehandlade prototyperna gör. Även här visas avvikelser vid 8 kHz. Nedan visas resultatet för THD för samma ytbehandlade prototyper, se figur 5.28.





**Figur 5.28. THD för ytbehandling med spackel av prototyper med FDM i PLA.**

Resultatet för THD visar att ytbehandlingarna ger upphov till liknande mängd störningar som både den obehandlade prototypen och referenshögtalaren gör. De ytbehandlade prototyperna är något mer lik referensen än vad den obehandlade är men skillnaderna är små.

Spridningsdiagram, DI och täckningsvinklar för de spacklade prototyperna visas i avsnitt C.1.1.2 i bilaga C. I diagrammen visas det att spridningsmönstret för de behandlade prototyperna är lika spridningsmönstret för den obehandlade. Ett undantag för samtliga spacklade prototyperna visas vid frekvensen 8 kHz.

### 5.3.4 Lyssningstest

Prototyperna i gips och lera jämfördes med referenshögtalaren i ett lyssningstest. För prototypen i gips hördes en tydlig skillnad. Ljudet upplevdes mycket burkigare men mindre sprakigt än referensen. Även lerprototypen gav upphov till burkigare ljud men skillnaden var inte lika stor som för gipsprototypen. Lerprototypen upplevdes också som mindre sprakig än referenshögtalaren.

När prototyperna med MJP, FDM i PLA och FDM i PA med kolfiber jämfördes med referenshögtalaren upplevdes ingen skillnad i ljudet. Samma resultat gäller för de ytbehandlade prototyperna.

### 5.3.5 Sammanfattande resultat för horn av plast

De akustiska egenskaperna för de handgjorda prototyperna skilde sig mycket från referensens. Samtliga additivt tillverkade prototyper replikerade referensen väl.

Ytbehandlingarna som testades för dessa prototyper visade ingen tydlig förändring av prototypens akustiska egenskaper. Resultaten kommer diskuteras vidare i kapitel 7.

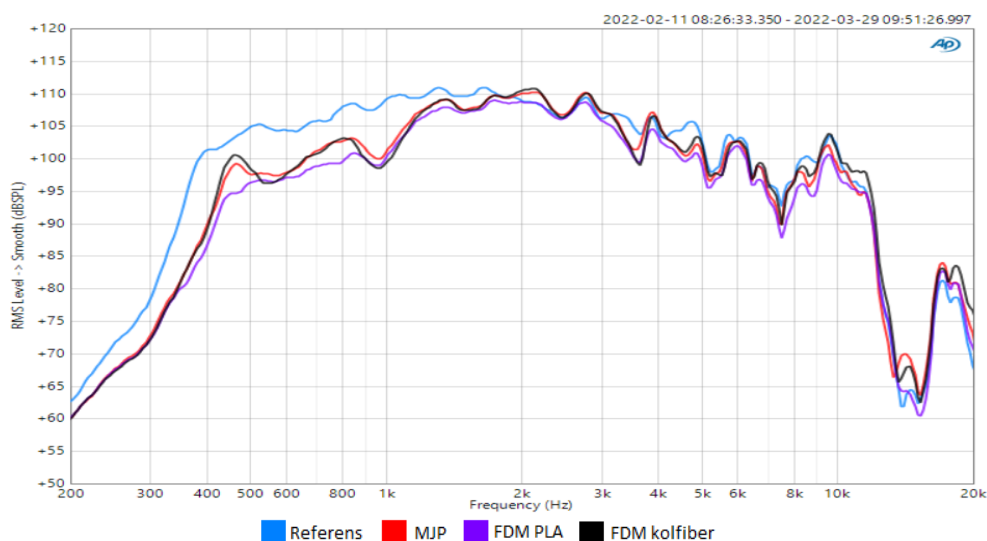
## 5.4 Resultat för horn av metall

I detta avsnitt presenteras resultat för de akustikmätningar som har utförts av prototyperna för högtalaren av metall, högtalare 2. Precis som för resultatet för horn av plast representerar den blå kurvan även här referenshögtalaren. Axlarna i graferna som presenteras har samma enheter som graferna som presenterats ovan.

### 5.4.1 Additivt tillverkade prototyper

#### 5.4.1.1 Frekvenssvar

I figur 5.29 presenteras frekvenssvaret för de additivt tillverkade prototyperna. Den röda kurvan representerar MJP och den lila representerar FDM i PLA. I ett försök att förbättra prototyperna för metallhornet testades FDM i PA med kolfiber. Prototypen med kolfiber representeras av den svarta kurvan.



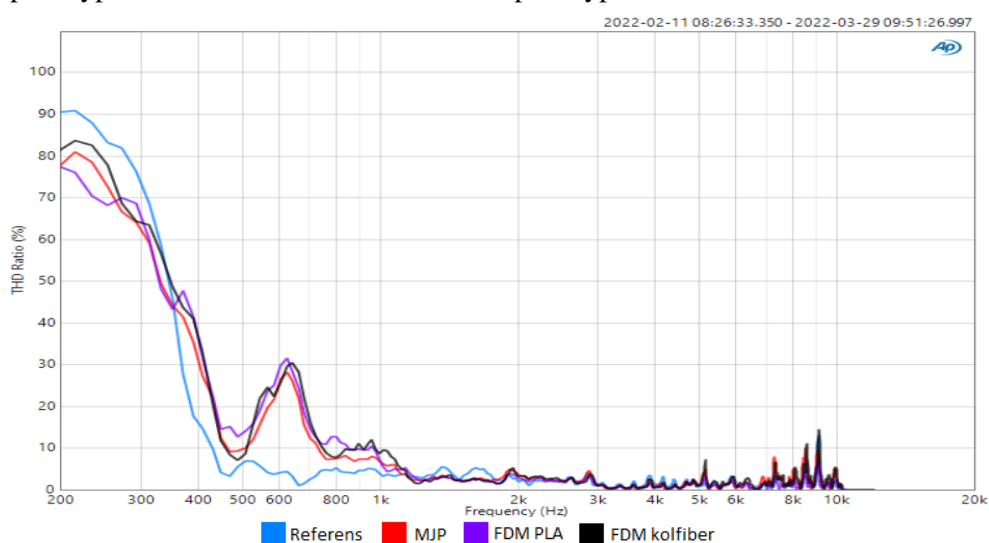
Figur 5.29. Frekvenssvar för de additivt tillverkade prototyperna.

Som visas i figuren ovan skiljer sig frekvenssvaret mellan prototyperna och referenshögtalaren. Detta är särskilt tydligt för frekvenser under 2 kHz. Vid 800 Hz är ljudnivån för prototypen med FDM i PLA cirka 9 dB lägre än vad ljudnivån för referensen är. Vid samma frekvens är skillnaden mellan MJP och referensen cirka 5 dB. I hela frekvensområdet syns det att MJP efterliknar referensen bättre än vad

prototypen med FDM i PLA gör då den har högre ljudnivå. I frekvensområdet 400–1 000 Hz har prototypen med FDM i PLA ett jämnare frekvenssvar än vad prototypen med MJP har. Från resultatet visas det att prototypen med FDM i PA med kolfiber efterliknar referensens ljudnivå bättre än vad FDM i PLA gör. Frekvenssvaret för prototypen med FDM i PA med kolfiber är likt frekvenssvaret för prototypen med MJP.

#### 5.4.1.2 THD

I figur 5.30 presenteras THD för de additivt tillverkade prototyperna. Likt ovan representerar den röda kurvan prototypen med MJP, den lila representerar prototypen med FDM i PLA och den svarta prototypen med FDM i PA med kolfiber.

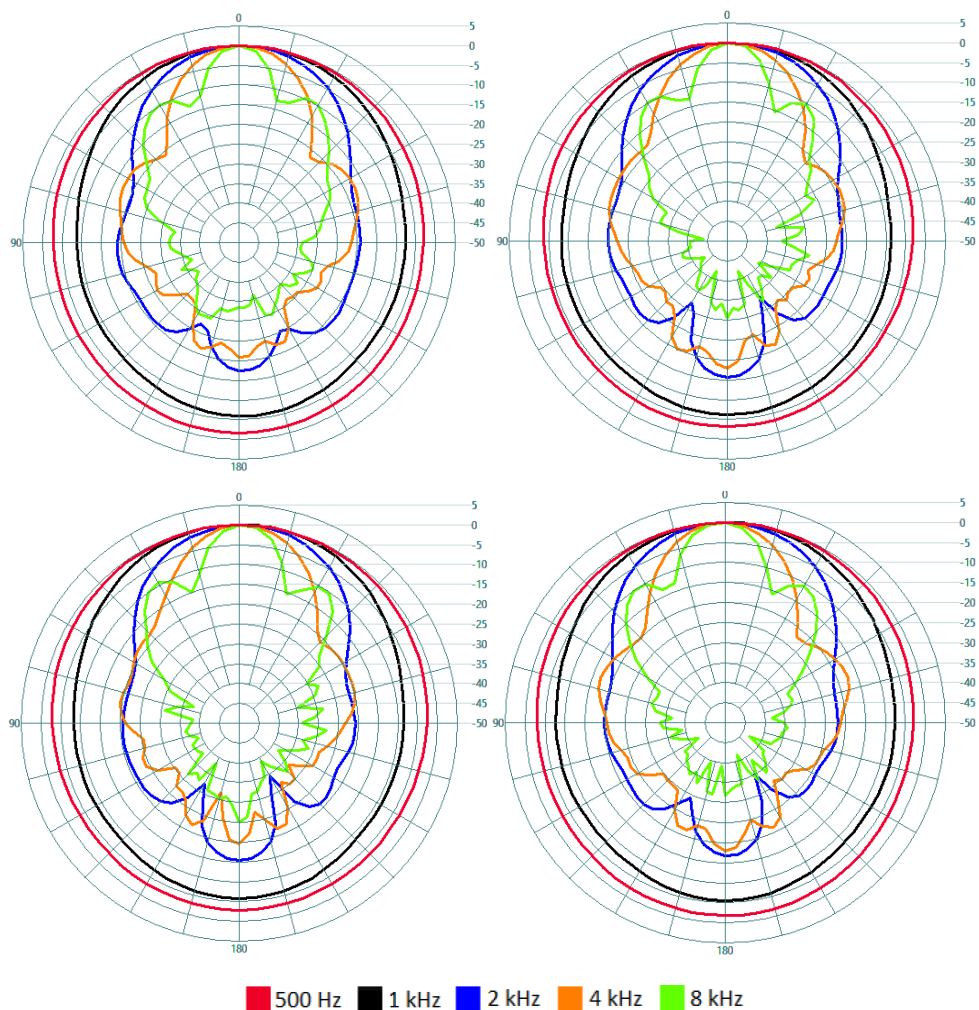


**Figur 5.30. THD för additivt tillverkade prototyper.**

Även resultatet för THD visar att prototyperna skiljer sig från referensen för frekvenser under 2 kHz. För högre frekvenser kan ingen tydlig skillnad ses. Inga tydliga skillnader visas mellan prototyperna.

#### 5.4.1.3 Spridningsmönster

Nedan visas spridningsdiagram för referenshögtalaren och de additivt tillverkade prototyperna, se figur 5.31.



**Figur 5.31. Spridningsdiagram för additivt tillverkade prototyper. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar prototyp med MJP, nedre vänstra visar prototyp med FDM i PLA och nedre högra prototyp med FDM i PA med kolfiber.**

Spridningsmönstret för de olika prototyperna är lika i sin form för samtliga frekvenser jämfört med referensen. Inga tydliga skillnader kan utläsas från diagrammen.

Nedan presenteras DI och täckningsvinkel för referensen och de additivt tillverkade prototyperna, se tabell 5.7 och 5.8.

**Tabell 5.7. DI för additivt tillverkade prototyper vid olika frekvenser.**

Prototyp	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Referens	1,72	4,52	8,12	9,93	11,56
MJP	2,26	4,72	8,17	9,91	11,52
FDM i PLA	1,92	4,45	8,16	9,98	11,3
FDM i PA	1,77	4,40	8,11	10,02	11,11

I tabellen visas det att prototypernas DI är lika referensens för samtliga frekvenser.

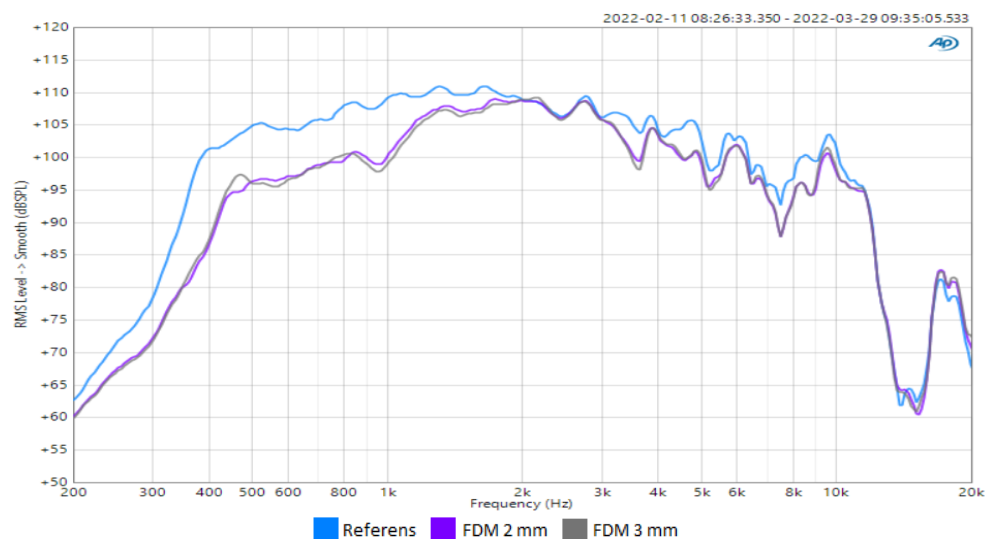
**Tabell 5.8. Täckningsvinklar för additivt tillverkade prototyper vid olika frekvenser.**

Prototyp	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Referens	360°	125°	65°	40°	21°
MJP	360°	117°	64°	40°	22°
FDM i PLA	360°	123°	64°	39°	24°
FDM i PA	360°	126°	66°	38°	26°

I denna tabell visas det att täckningsvinklarna för prototyperna överensstämmer väl med referensens täckningsvinklar.

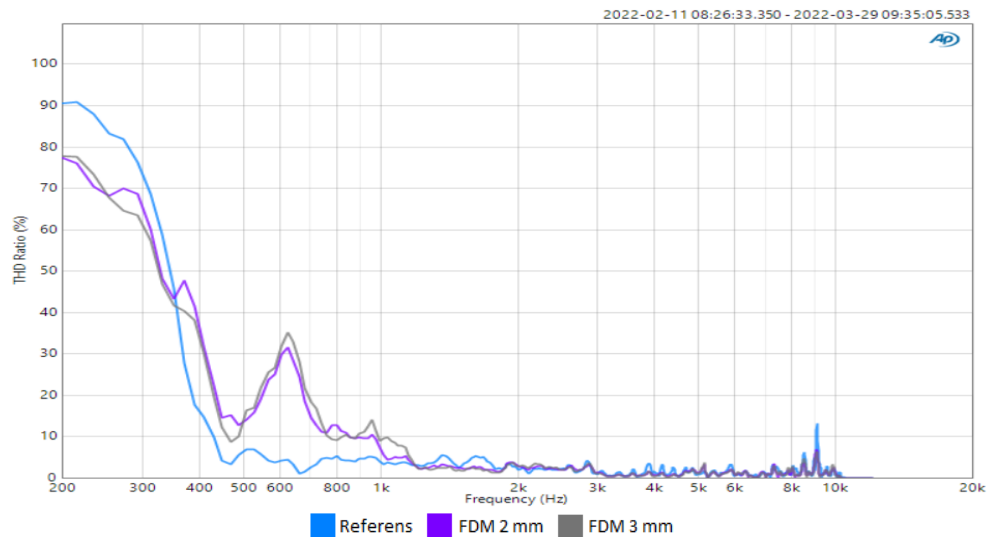
#### 5.4.1.4 Olika vägg tjocklekar för FDM i PLA

Nedan presenteras resultatet för prototyper med olika vägg tjocklekar för FDM i PLA, se figur 5.32 och 5.33. Den första bilden visar frekvenssvaret och den senare visar THD. Den lila kurvan representerar prototypen med två millimeters vägg tjocklek och den grå kurvan prototypen med tre millimeters vägg tjocklek.



**Figur 5.32. Frekvenssvar för prototyper med olika tjocklek på ytterhorn med FDM i PLA.**

Frekvenssvaret för prototyperna med olika vägg tjocklek efterliknar varandra väl. Båda prototyperna skiljer sig från referensen och ingen tydlig skillnad mellan prototyperna visas.



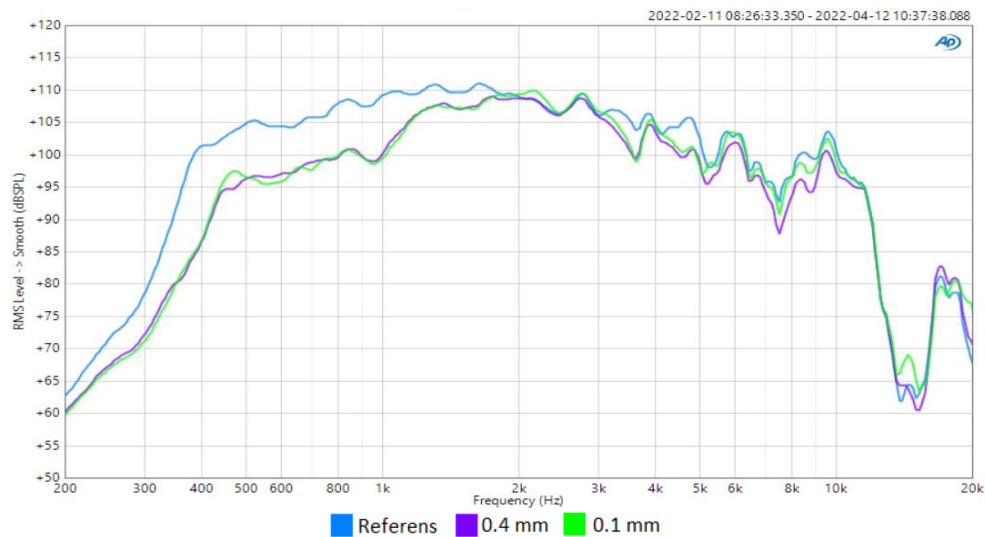
**Figur 5.33. THD för prototyper med olika tjocklek på ytterhorn med FDM i PLA.**

Likt resultatet från frekvenssvar överensstämmer THD för prototyperna väl med varandra. Ingen tydlig skillnad i störningar visas mellan prototyperna.

Spridningsdiagram, DI och täckningsvinklar presenteras i avsnitt C.2.1.1 i bilaga C. Ingen tydlig skillnad visades i spridningsmönster mellan de två prototyperna med olika vägg tjocklek. Även data för DI och täckningsvinklar visades lika för prototyperna.

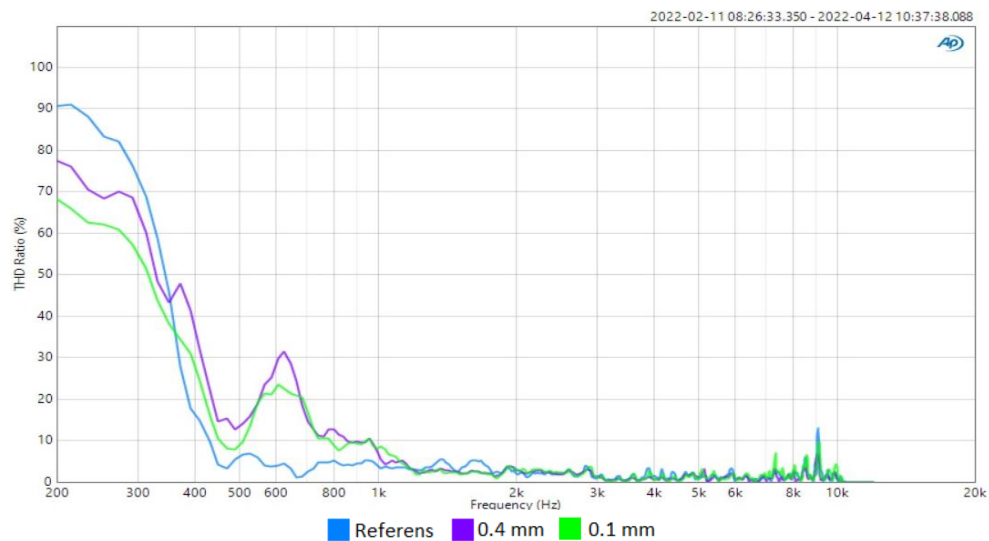
#### 5.4.1.5 Olika höjd på utskriftslager för FDM i PLA

Nedan presenteras resultatet för olika höjd på utskriftslager för FDM i PLA, se figur 5.34 för frekvenssvar och figur 5.35 för THD. Den lila kurvan representerar prototypen med utskriftslager på 0,4 millimeter och den gröna kurvan prototypen med utskriftslager på 0,1 millimeter.



**Figur 5.34. Frekvenssvar för prototyper med FDM i PLA med olika höjd på utskriftslager.**

Som visas i frekvenssvaret är prototyperna med olika höjd på utskriftslager lika varandra. För frekvenser över 3 kHz är prototypen med lägre höjd på utskriftslagren något mer lik referensen. För lägre frekvenser är de två prototyperna lika varandra och skiljer sig från referensen.



**Figur 5.35. THD för prototyper med FDM i PLA med olika höjd på utskriftslager.**

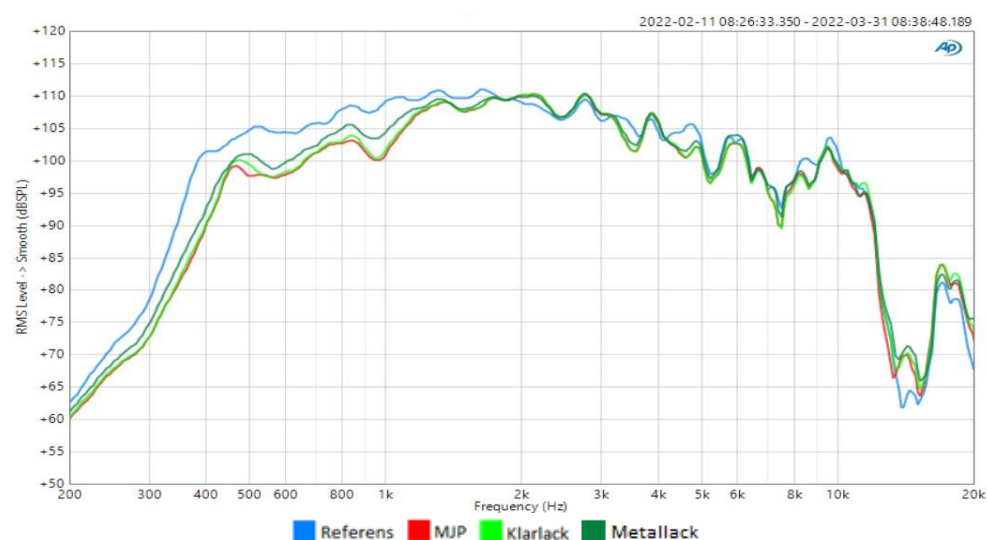
För frekvenser över 2 kHz följer prototyperna referensen väl. För lägre frekvenser syns större skillnader. Prototypen med lägre höjd på utskriftslagren visar mindre andel störningar än vad prototypen med högre höjd på utskriftslagren gör och är därmed något mer lik referensen.

I spridningsmönstret för prototyperna med olika höjd på utskriftslagren visades ingen tydlig skillnad. Spridningsdiagrammen, DI och täckningsvinklar presenteras i avsnitt C.2.1.2 i bilaga C.

## 5.4.2 Ytbehandling

### 5.4.2.1 Lack

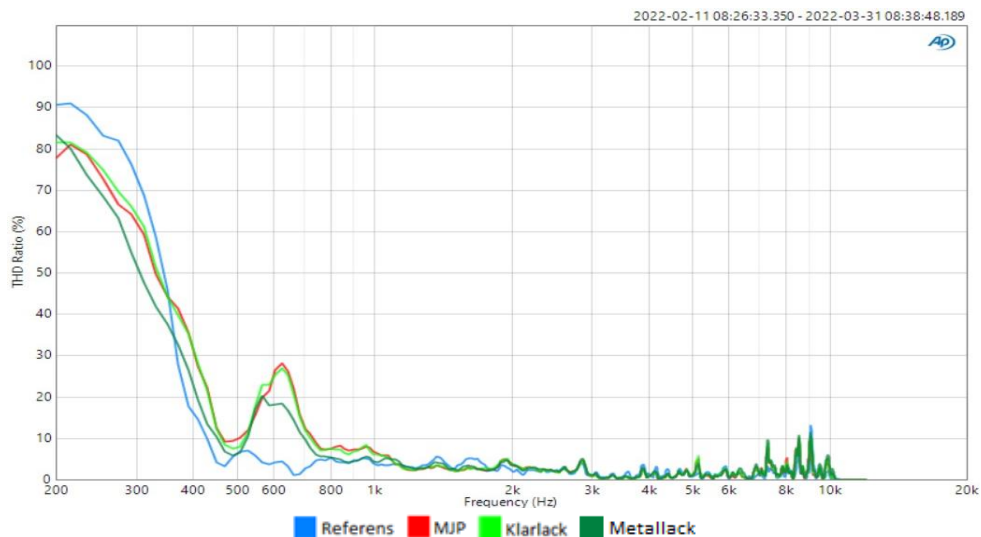
Nedan visas resultatet för lackade prototyper utskrivna med MJP. I figur 5.36 visas frekvenssvaret och i figur 5.37 visas THD. Den röda kurvan representerar den obehandlade prototypen och den ljusgröna representerar den klarlackade. I ett försök att förbättra prototyperna för metallhornet testades metallack som ytbehandling. Den metallackade prototypen representeras av den mörkgröna kurvan.



**Figur 5.36. Frekvenssvar för lackade prototyper med MJP.**

I frekvenssvaret kan det ses att den klarlackade prototypen beter sig likt den obehandlade prototypen. Den metallackade prototypen har högre ljudnivå än den obehandlade för frekvenser under 2 kHz. Resultatet visar att den metallackade prototypen efterliknar ljudnivån av referensen bättre.

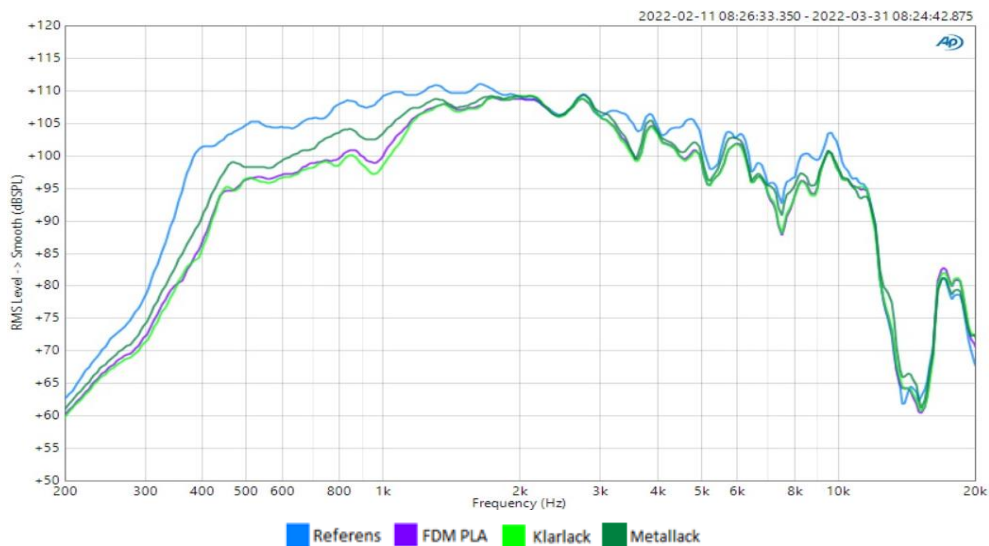




**Figur 5.37. THD för lackade prototyper med MJP.**

Resultatet för THD visar också att den metallackade prototypen efterliknar referensen bättre än vad den obehandlade gör. Även här visas det att den klarlackade prototypen är lik den obehandlade prototypen.

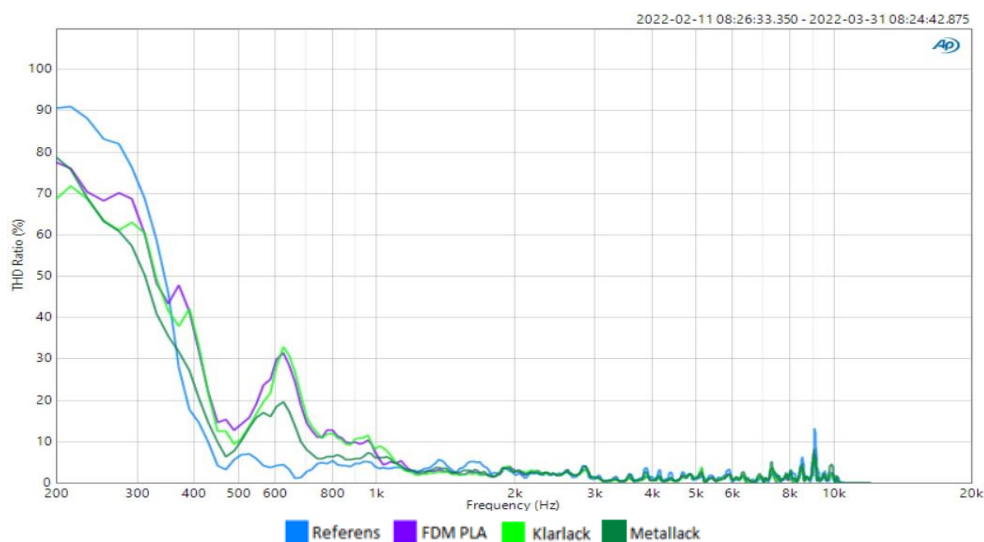
Nedan visas resultat för lackade prototyper utskrivna med FDM i PLA. Se figur 5.38 för frekvenssvar och figur 5.39 för THD. Den lila kurvan representerar den obehandlade prototypen, den ljusgröna representerar den klarlackade prototypen och den mörkgröna den metallackade.



**Figur 5.38. Frekvenssvar för lackade prototyper med FDM i PLA.**

I resultatet för frekvenssvar visas det att klarlack inte har någon inverkan på resultatet, den ljusgröna och den lila kurvan följer varandra väl över hela

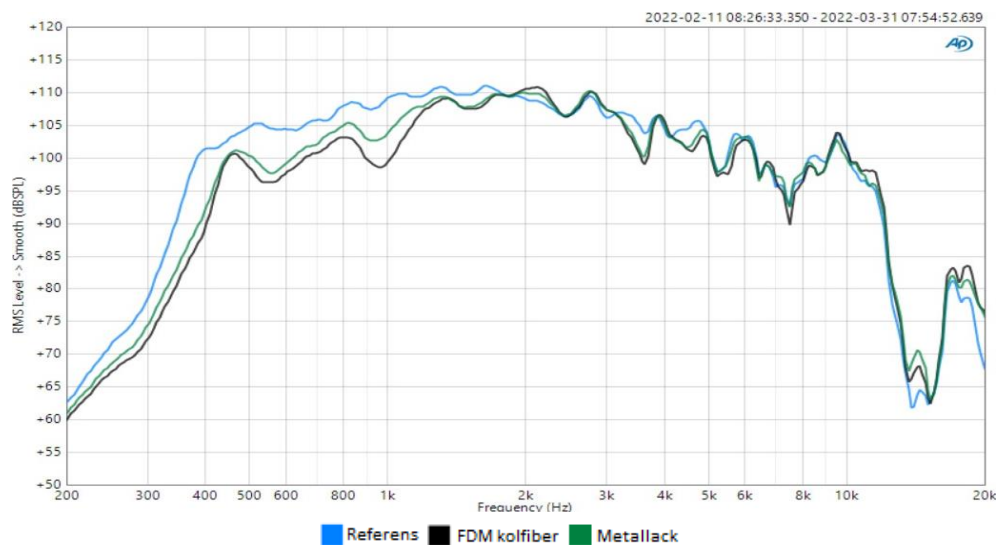
frekvensområdet. För frekvenser under 2 kHz visar den metallackade prototypen en förbättring i ljudnivå jämfört med den obehandlade och därmed större likhet med referenshögtalaren. För högre frekvenser syns inga skillnader mellan de lackade prototyperna och den obehandlade.



**Figur 5.39. THD för lackade prototyper med FDM i PLA.**

Resultatet för THD visar samma mönster. Den metallackade prototypen visar en förbättring då denna har mindre störningar för låga frekvenser och därmed är mer lik referensen.

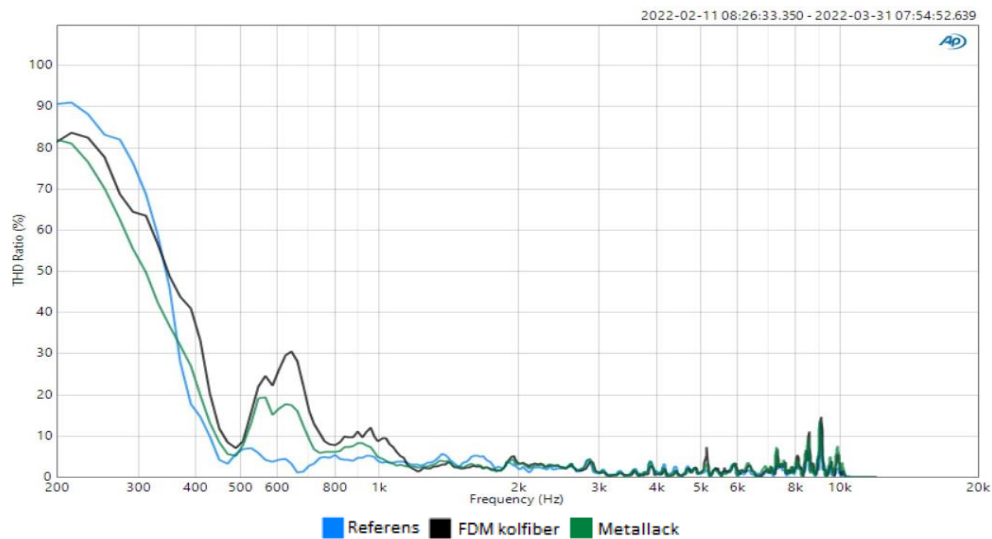
I figur 5.40 nedan visas frekvenssvaret för den metallackade prototypen med FDM i PA med kolfiber. Den svarta kurvan representerar den obehandlade prototypen och den gröna representerar den metallackade.



**Figur 5.40. Frekvenssvar för metallackad prototyp med FDM i PA med kolfiber.**

I frekvenssvaret syns det att den metallackade prototypen efterliknar referensen bättre än vad den obehandlade gör. Detta är tydligt för frekvenser under 2 kHz. För högre frekvenser syns ingen skillnad för den metallackade och den obehandlade prototypen där båda efterliknar referensen.

I figur 5.41 visas THD för samma prototyper som ovan.



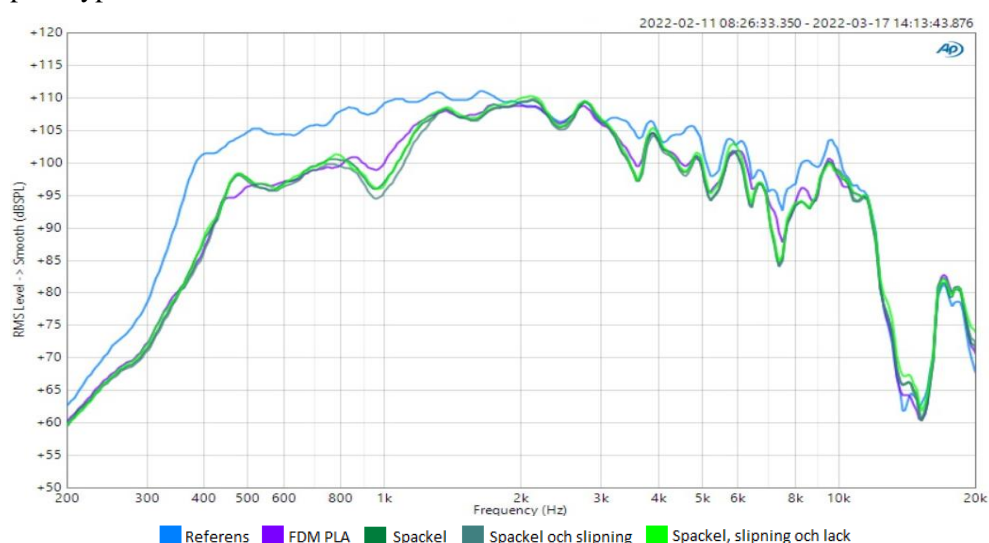
**Figur 5.41. THD för metallackad prototyp med FDM i PA med kolfiber.**

Även här syns det, vid låga frekvenser, att den metallackade prototypen är mer lik referensen än vad den obehandlade är.

Spridningsmönstren för samtliga lackade prototyper visade ingen tydlig skillnad jämfört med spridningsmönstren för de obehandlade prototyperna. Spridningsdiagram, DI och täckningsvinklar presenteras i avsnitt C.2.2.1 i bilaga C.

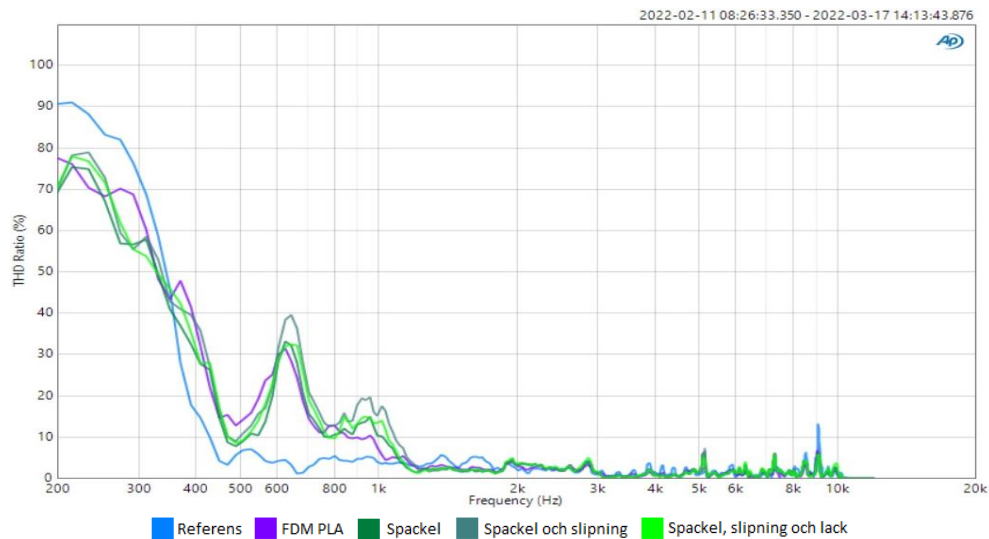
#### 5.4.2.2 Spackel

Nedan presenteras resultatet av ytbehandlingar med spackel för prototyper utskrivna med FDM i PLA. I figur 5.42 visas frekvenssvaret och i figur 5.43 visas THD. Den lila kurvan representerar den obehandlade prototypen, den mörkgröna kurvan representerar den spacklade prototypen, den turkosa representerar den spacklade och slipade prototypen och den ljusgröna den spacklade, slipade och lackade prototypen.



**Figur 5.42. Frekvenssvar för ytbehandling med spackel av prototyper med FDM i PLA.**

Som visas i figuren har ingen av ytbehandlingarna med spackel förbättrat den obehandlade prototypen. Vid 1 kHz ses en försämring av ljudnivån för de ytbehandlade prototyperna jämfört med den obehandlade.



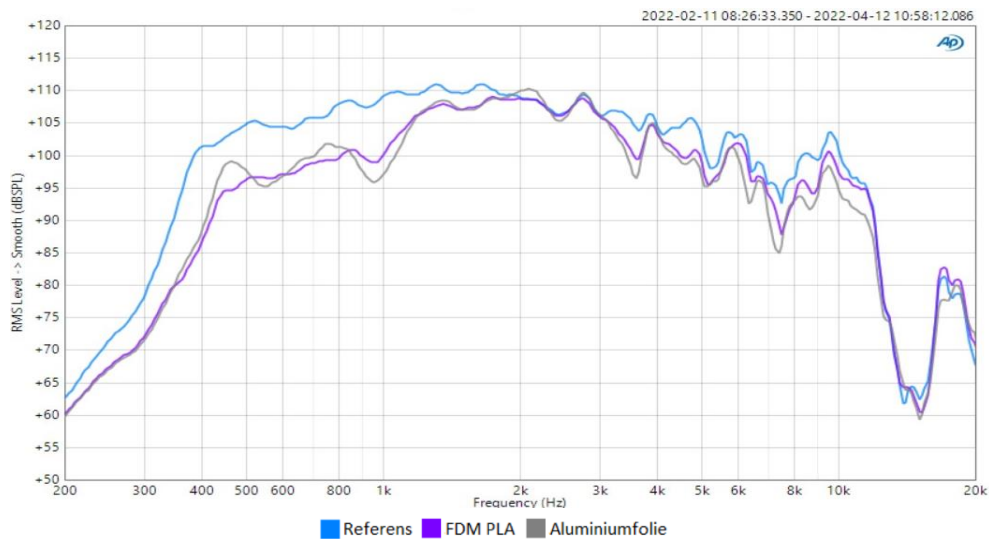
**Figur 5.43. THD för ytbehandling med spackel av prototyper med FDM i PLA.**

Även resultatet för THD visar att ytbehandlingarna inte förbättrar den obehandlade prototypen. Runt 1 kHz syns att de ytbehandlade prototyperna har högre andel störningar jämfört med den obehandlade och att de därmed avviker mer från referensen.

Spridningsmönstren för de spacklade prototyperna visade ingen tydlig skillnad jämfört med spridningsmönstren för de obehandlade prototyperna. Spridningsdiagram, DI och täckningsvinklar presenteras i avsnitt C.2.2.2 i bilaga C.

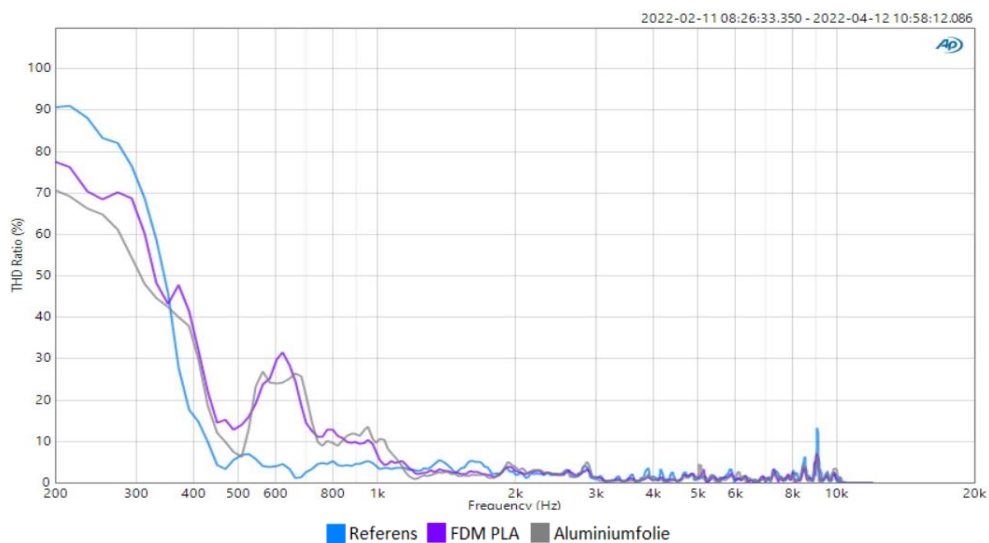
#### 5.4.2.3 Aluminiumfolie

Nedan visas resultatet av den aluminiumfolieklädda prototypen utskriven med FDM i PLA. I figur 5.44 visas frekvenssvaret och i figur 5.45 visas THD.



**Figur 5.44. Frekvenssvar för aluminiumfolieklädd prototyp med FDM i PLA.**

Som visas i frekvenssvaret förbättrar inte ytbehandlingen med aluminiumfolie prototypen. För frekvenser mellan 3 och 12 kHz har den ytbehandlade prototypen lägre ljudnivå än referensen och den obehandlade prototypen. För lägre frekvenser har den folieklädda prototypen ett mer ojämnt frekvenssvar än den obehandlade.



**Figur 5.45. THD för aluminiumfolieklädd prototyp med FDM i PLA.**

Resultatet för THD visar att den ytbehandlade prototypen har ett beteende som är likt den obehandlade och skiljer sig därmed från referensen.

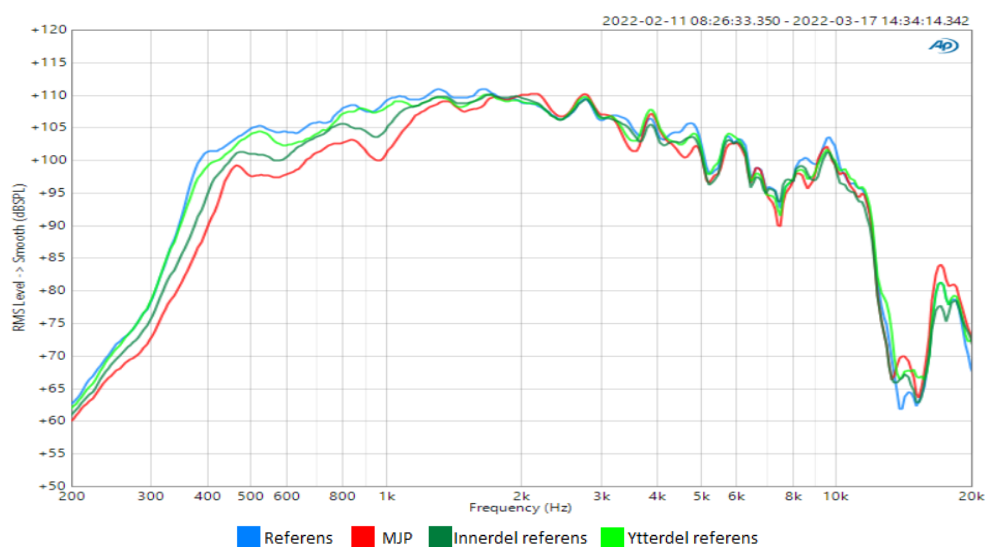
Spridningsmönstren för den aluminiumfolieklädda prototypen visade ingen tydlig skillnad jämfört med spridningsmönstret för den obehandlade. Spridningsdiagram, DI och täckningsvinklar presenteras i avsnitt C.2.2.3 bilaga C.

### 5.4.3 Horndelarnas inverkan

Det undersöktes vilka delar av hornet som hade störst påverkan på de akustiska egenskaperna för att se om kombinationer av prototypmetoder kan vara ett alternativ för att förbättra prototyperna. En horndel som har stor inverkan på de akustiska egenskaperna hade kunnat tillverkas med en mer avancerad metod om det visades gynnsamt för de akustiska egenskaperna och en horndel med mindre inverkan kan tillverkas med en enklare metod.

För att göra denna undersökning gjordes akustikmätningar för kombinationer av horndelar från referenshögtalaren och horndelar från prototyperna. Mätningar gjordes endast för högtalare 2 och med MJP som prototypmetod. Kombinationen med referenshögtalarens ytterhorn och prototypens innerdel testades. Det testades också att kombinera ytterhornet av prototypen och innerdelen från referenshögtalarens.

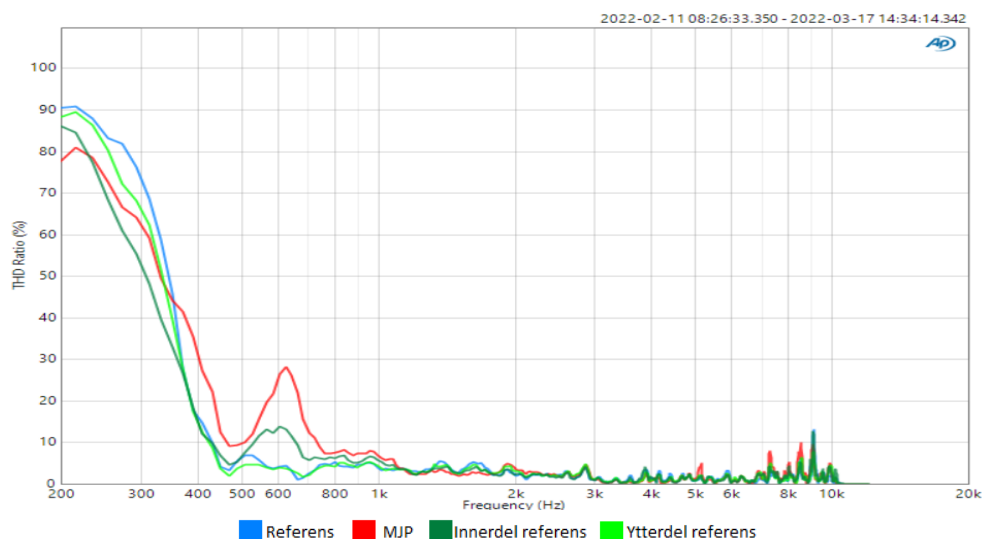
Nedan visas resultatet för akustikmätningar av dessa kombinationer. I figur 5.46 visas frekvenssvaret och i figur 5.47 visas THD. Den röda kurvan representerar prototyp tillverkad med MJP. Den mörkgröna kurvan representerar kombinationen där innerdelen är från referenshögtalaren och ytterhornet tillverkad med MJP. Den ljusgröna kurvan representerar kombinationen där ytterhornet är från referenshögtalaren och innerdelen tillverkad med MJP.



**Figur 5.46. Frekvenssvar för kombinationer av horndelar från referenshögtalare och horndelar från prototyp med MJP.**

Som visas i figuren ovan syns det att båda kombinationerna ligger mellan referensen och MJP-prototypen i ljudnivå i hela frekvensområdet. Detta visar att båda delarna har en inverkan på resultatet. Kombinationen med ytterdelen från referenshögtalaren och innerdel från MJP-prototypen ligger närmre referensen än vad den andra kombinationen gör. Detta tyder på att ytterhornet bidrar till mer

skillnader för de akustiska egenskaperna än vad innerdelen gör. I figur nedan visas resultatet för THD.



**Figur 5.47. THD för kombinationer av horndelar från referenshögtalare och horndelar från prototyp med MJP.**

Resultatet för frekvenser över 400 Hz visar att kombinationen där ytterdelen är från referenshögtalaren och innerdelen från MJP-prototypen är lik resultatet för referenshögtalaren. Detta tyder på att innerdelen tillverkad med MJP ger upphov till liknande störningar som referenshögtalarens innerdel. Ytterhornet tillverkat med MJP ger upphov till mer störningar än referenshögtalarens ytterhorn. För frekvenser över 1 kHz överensstämmer de båda kombinationerna väl med referensen och prototypen tillverkad med MJP.

#### 5.4.4 Lyssningstest

När prototyperna med MJP och FDM i PLA jämfördes med referensen var skillnaden knappt märkbar. Den lilla skillnad som hördes var att ljudet från båda prototyperna upplevdes med mindre efterklang än referensen. Ingen skillnad kunde urskiljas mellan MJP och FDM i PLA.

Då FDM i PA med kolfiber jämfördes med referensen upplevdes ljudet som aningen klarare än referensen. Ljudet för prototypen med kolfiber upplevdes likt ljudet för prototypen med MJP. Dock kunde en liten skillnad urskiljas i att ljudet för prototypen med kolfiber upplevdes som lite klarare.

Den metallackade kolfiberprototypen jämfördes med den obehandlade kolfiberprototypen. Ljudet för den metallackade upplevdes något dovare än ljudet för den obehandlade. För resterande ytbehandlade prototyper kunde ingen skillnad höras jämfört med de obehandlade prototyperna.



Då ljudet för FDM-prototyperna med olika väggjocklekar jämfördes med varandra upptäcktes ingen märkbar skillnad. Ingen skillnad hördes heller för prototyperna med olika höjd på utskriftslagrena.

#### **5.4.5 Sammanfattande resultat för horn av metall**

De akustiska egenskaperna för prototyperna och referenshögtalaren av metall skilde sig från varandra. De metoder som var mest lika referensen var MJP och FDM i PA med kolfiber. För prototyper med olika väggjocklek visades ingen skillnad mellan prototyperna. För prototyper med olika höjd på utskriftslager var skillnaderna små, en liten förbättring visades för prototypen med lägre höjd på utskriftslager. Ytbehandling med metallack visades vara den enda ytbehandlingen som förbättrade de akustiska egenskaperna av prototyperna och därmed gjorde dessa mer lika referensen. Det visades att både hornets inner- och ytterdel hade en påverkan på de akustiska egenskaperna men att ytterdelen bidrar till mer skillnader än vad innerdelen gör. Resultaten kommer diskuteras vidare i kapitel 7.

## 6 Testning av prototypmetoder för fäste till högtalarelement

*I detta kapitel beskrivs tillvägagångssätt för tillverkning av prototyper för fäste till högtalarelement. Akustiktester för fästena utförs och resultaten av dessa presenteras.*

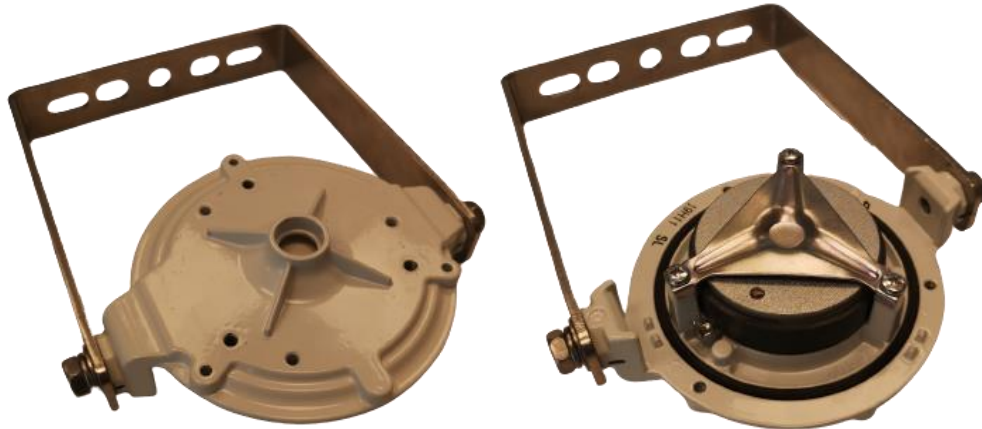
### 6.1 Prototyp tillverkning

För att undersöka om prototyper för fäste till högtalarelementen kan replikera de akustiska egenskaperna av referensen testades prototypmetoder även för dessa. Med fäste till högtalarelement menas de delar som håller högtalarelementet på plats i hornet, se figur 6.1 för fäste till högtalare 1. Fästet till högtalare 1 består av en del som är tillverkad i ABS.



**Figur 6.1. Fram- och baksida av fäste till högtalarelement för högtalare 1.**

Fästet till högtalare 2 består av tre delar och visas i figur 6.2. Dessa är det vita fästet, brickan som håller högtalarelementet på plats i fästet och en fasplugg som är placerad mellan högtalarelementet och fästet. Det vita fästet och brickan är tillverkade av metall och faspluggen är tillverkad i ABS. För högtalare 2 fanns det också tätningringar mellan högtalarelementet och fästet. Dessa har inte gjorts prototyper av. Vid monteringen av prototyperna har i stället tätningringarna från referenshögtalaren använts.



Figur 6.2. Fram- och baksida av fäste till högtalarelementet för högtalare 2.

De metoder som användes för utskrift av högtalarelementens fästen var MJP och FDM i PLA. Dessa metoder användes då de hanterar komplexa former och är lättillgängliga. För att ta fram prototypdelar skapades digitala modeller som sedan användes vid utskrift. Processen för att skapa digitala modeller är tidigare beskrivet i avsnitt 5.1.3.

Små ändringar i den digitala modellen för fästet till högtalare 2 gjordes för att garantera säker infästning av högtalarelementet. Att skriva ut delar med små skruvhål med gängor är svårt med denna prototypmetoderna och därför anpassades delarna med genomgående skruvhål där mutter kunde användas för att fästa högtalarelementet.

### 6.1.1 Multijet Printing

Skrivaren för MJP var inte begränsad i dimensionerna för fästet vilket gjorde att delarna kunde skrivas ut hela. I figur 6.3 nedan visas resultatet för fästen till båda referenshögtalarna utskrivna med MJP. Framsidan av fästena visas, det vill säga den sida där hornet placeras.



**Figur 6.3.** Till vänster visas fäste för högtalare 1 och till höger visas fäste för högtalare 2 tillverkat med MJP.

Metoden gav jämn yta och fina detaljer. Detta är en fördel när prototyper av fästen för högtalarelement görs då dessa är detaljrika. Att metoden gav precis utskrift gjorde att delarna passade bra ihop med varandra vid montering av högtalarelement och horn. En annan fördel med metoden var att skruvhålen kunde gängas med skruv då högtalarelementet skulle fästas. Detta eftersom materialet var tillräckligt mjukt. En nackdel med att materialet var mjukt var att brickan bakom högtalarelementet för högtalare 2 böjdes under montering. Ytterligare en nackdel med metoden var att en tunn vägg på prototypen för fästet till högtalare 2 gick sönder. Anledningen till detta var att metoden ger ömtåliga delar. Denna trasiga del påverkade inte funktionen för fästet och prototypen kunde användas ändå. Tillverkningstiden för fästet av plast var 9 timmar och för fästet av metall var den 17 timmar. Materialkostnaden för prototypen för fästet av plast var 372 kronor och för prototypen för fästet av metall var den 691 kronor.

### 6.1.2 Fused Deposition Modeling i PLA

Då FDM användes som prototypmetod kunde fästena skrivas ut som hela delar. I figur 6.4 nedan visas resultatet för referenshögtalarnas fästen utskrivna med FDM i PLA. För högtalare 1 visas framsidan av fästet och för högtalare 2 visas baksidan.



**Figur 6.4. Till vänster visas fäste för högtalare 1 och till höger visas fäste för högtalare 2 tillverkat med FDM i PLA.**

Metoden gav robusta delar som var mindre ömtåliga än prototyperna med MJP. Däremot var denna metod inte lika precis och gav inte lika fina detaljer. Detta gjorde att snäppena på fästet till högtalare 1 inte greppade en av innerdelarna bra. Hålet i mitten på fästet höll inte dimensionerna vilket gjorde att denna behövdes slipas för att passa den andra innerdelen. Även skruvhålen blev trånga vid utskrift vilket gjorde det svårt att fästa skruvarna. En annan nackdel med metoden var att det var svårt att avlägsna stödmaterialet för de mest detaljerade delarna. Det var också svårt att urskilja vad som var stödmaterial och inte. Detta resulterade i ett litet hål i fästets vägg till högtalare 1. Tillverkningstiden för fästet av plast var 2 timmar och för fästet av metall var den 5 timmar. Materialkostnaden för fästet av plast var 13 kronor och för fästet av metall var den 26 kronor.

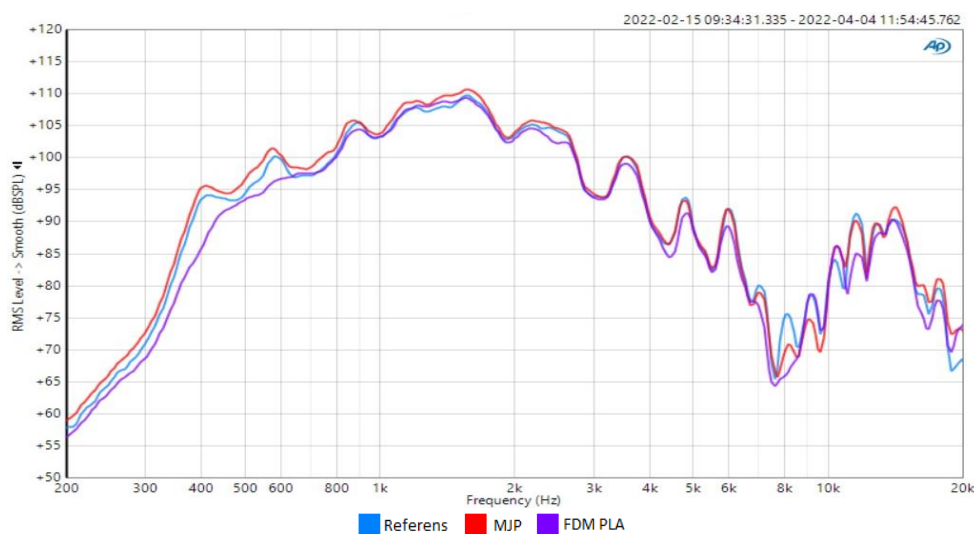
## 6.2 Akustikmätning

Samma akustikmätningar som gjordes för horndelarna genomfördes för fästena till högtalarelementen. Metoden för mätningarna är tidigare beskriven i avsnitt 5.2. Vid dessa mätningar användes horndelar från referenshögtalare och prototypdelar för fästena. Detta gjordes för att isolera resultatet till att endast visa fästet för högtalarelementets inverkan. Med detta kunde prototypmetoderna för fästena enklare jämföras med varandra.

## 6.3 Resultat för högtalarelementets fäste av plast

### 6.3.1 Frekvenssvar

Nedan presenteras frekvenssvaret för prototyper av fästet som tillhör högtalaren av plast, se figur 6.5. Den blå kurvan representerar referenshögtalaren, den röda kurvan representerar prototypen med MJP och den lila prototypen med FDM i PLA.

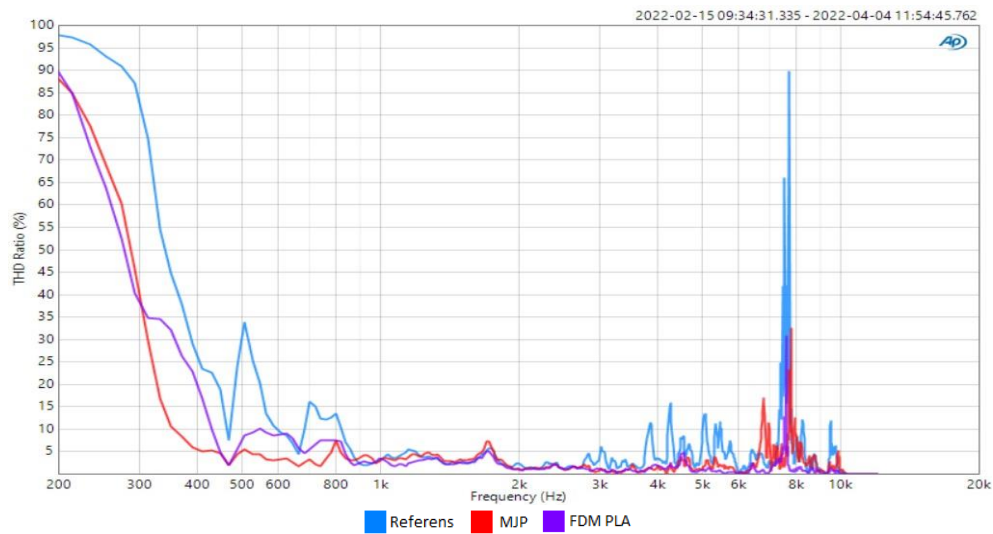


Figur 6.5. Frekvenssvar för additivt tillverkade prototyper för fäste av plast.

Prototypen med MJP efterliknar referensen väl. För frekvenser under 2 kHz är frekvenssvaret för prototypen med MJP något högre än referensen. Prototypen med FDM i PLA är lik referensen för frekvenser över 700 Hz. För lägre frekvenser är frekvenssvaret för denna prototyp lägre än referensens frekvenssvar.

### 6.3.2 THD

Nedan presenteras THD för prototyperna av fästet, se figur 6.6.

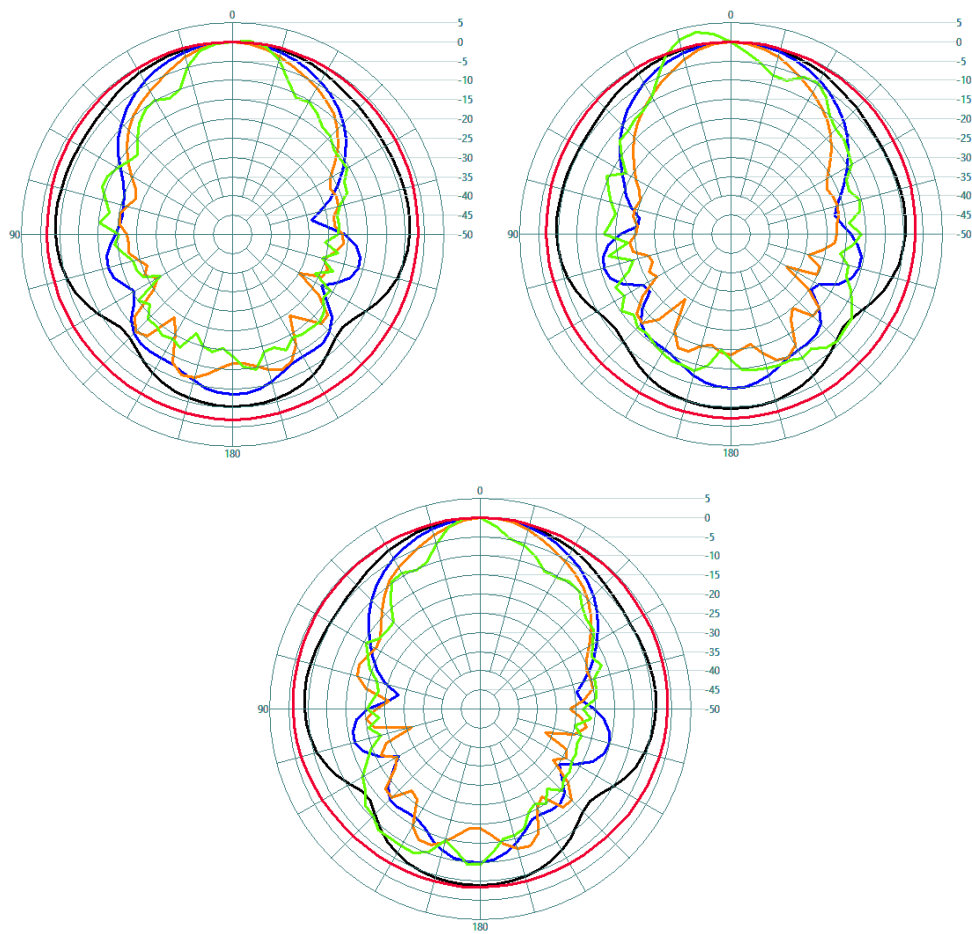


**Figur 6.6. THD för additivt tillverkade prototyper för fäste av plast.**

Båda prototyperna överensstämmer väl med referensen i intervallet 1–3 kHz. För frekvenser utanför detta intervall har referensen större andel störningar än vad prototyperna har. Ingen tydlig skillnad visas mellan prototypmetoderna med undantag för frekvenser under 800 Hz där prototypen med FDM i PLA är något mer lik referensen.

### 6.3.3 Spridningsmönster

Nedan presenteras spridningsdiagram för prototyperna av fästet, se figur 6.7.



■ 500 Hz  
 ■ 1 kHz  
 ■ 2 kHz  
 ■ 4 kHz  
 ■ 8 kHz

**Figur 6.7. Spridningsdiagram för prototyper för fäste av plast. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar prototyp med MJP och nedre visar prototyp med FDM i PLA.**

Spridningsmönstrena för prototyperna är lika spridningsmönstret för referensen. För frekvensen 8 kHz visas små avvikelser för prototyperna jämfört med referensen. I övrigt syns inga tydliga skillnader. Nedan presenteras DI för prototyperna och referensen, se tabell 6.1.



**Tabell 6.1. DI för prototyper av fästet vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,33	3,92	7,29	8,62	9,51
MJP	1,5	4,11	7,49	9,17	7,49
FDM i PLA	1,4	4,01	7,49	8,55	9,57

För frekvensen 8 kHz visas det även här en avvikelse för prototypen med MJP med ett lägre DI än referensen. DI för FDM i PLA är lik DI för referensen för alla frekvenser. Nedan presenteras resultatet för täckningsvinklarna för referens och prototyper, se tabell 6.2.

**Tabell 6.2. Täckningsvinklar för prototyper av fästet vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	214°	72°	55°	34°
MJP	360°	206°	72°	48°	39°
FDM i PLA	360°	212°	72°	57°	31°

För täckningsvinklarna visas liknande resultat som för DI. Prototypen med MJP är lik referensen men mindre avvikelser kan ses vid frekvenserna 1, 4 och 8 kHz. Prototypen med FDM i PLA är lik referensen för samtliga frekvenser.

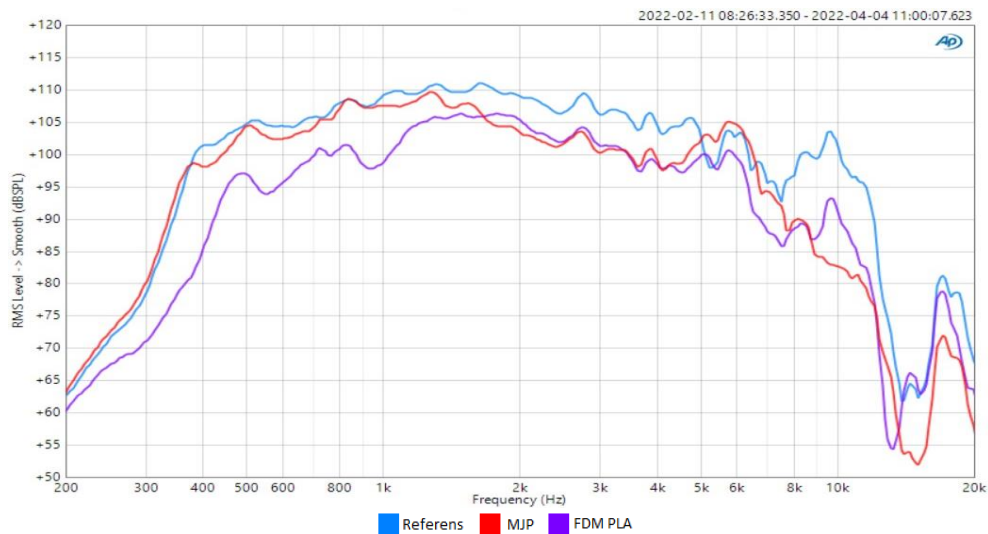
#### 6.3.4 Lyssningstest

Då prototyperna av fästet för högtalaren av plast jämfördes med referensen kunde skillnad höras. För prototyperna med MJP och FDM i PLA upplevdes ljudet mindre burkigt och sprakigt än ljudet för referensen. Ingen tydlig skillnad hördes mellan de två prototyperna.

## 6.4 Resultat för högtalarelementets fäste av metall

### 6.4.1 Frekvenssvar

I figuren nedan visas frekvenssvaret för prototyper av fästet till högtalaren av metall, se figur 6.8. Den blå kurvan representerar referenshögtalaren, den röda kurvan representerar prototypen med MJP och den lila prototypen med FDM i PLA.

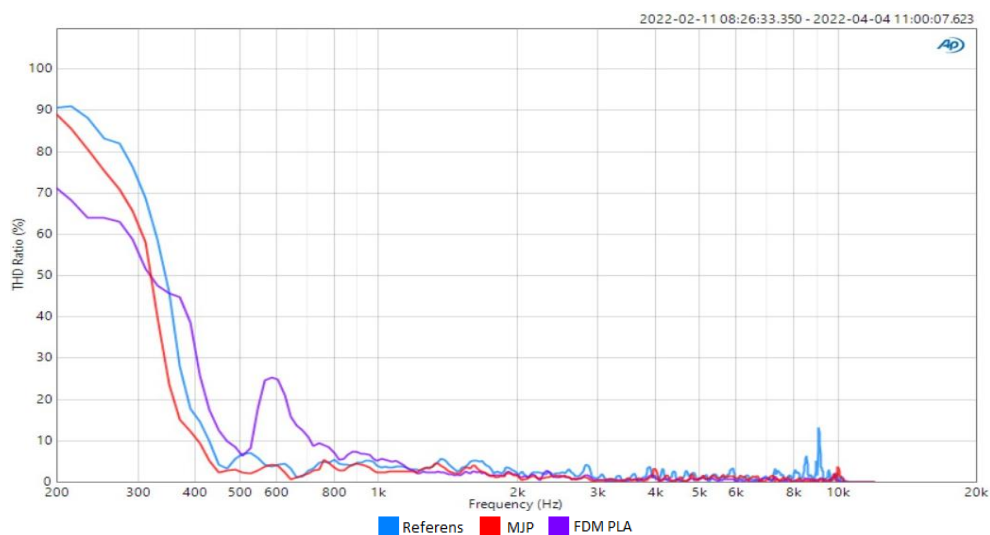


**Figur 6.8. Frekvenssvar för additivt tillverkade prototyper för fäste av metall.**

Frekvenssvaret för prototypen med MJP följer frekvenssvaret för referensen vid frekvenser under 1 kHz väl. För högre frekvenser är frekvenssvaret för prototypen lägre än referensens frekvenssvar med undantag för frekvenser runt 6 kHz. Frekvenssvaret för prototypen med FDM i PLA är lägre än frekvenssvaret för referensen i hela frekvensområdet.

#### 6.4.2 THD

Nedan presenteras THD för prototyperna av fästet, se figur 6.9.

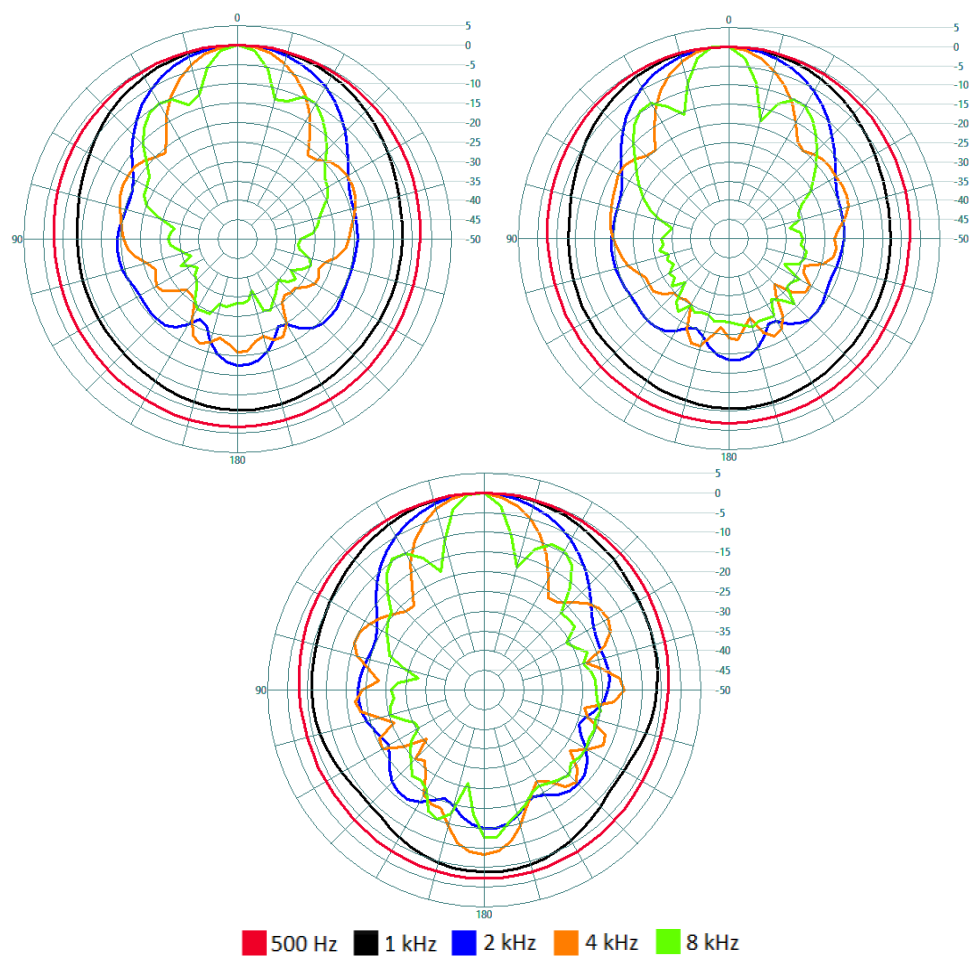


**Figur 6.9. THD för additivt tillverkade prototyper för fäste av metall.**

Resultatet visar att prototypen med MJP har liknande mängd störningar som referensen. För frekvenser under 600 Hz har prototypen med MJP något lägre andel störningar än vad referensen har. Vid 9 kHz har båda prototyperna lägre störningar än vad referensen har. Prototypen med FDM i PLA har högre andel störningar än referensen i intervallet 400–1 000 Hz.

### 6.4.3 Spridningsmönster

Nedan presenteras spridningsdiagram för prototyper av fästet, se figur 6.10.



**Figur 6.10. Spridningsdiagram för prototyper för fäste av metall. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar prototyp med MJP och nedre visar prototyp med FDM i PLA.**

Spridningsmönstret för prototypen med MJP efterliknar spridningsmönstret för referensen väl. Inga tydliga skillnader visas. För prototypen med FDM i PLA visas avvikelser för samtliga frekvenser. Särskilt tydligt är detta för frekvenserna 4 och 8

kHz. Här syns det att den relativa ljudnivån för dessa frekvenser är högre bakom prototypen jämfört med referenshögtalaren. Detta betyder att ljudet för prototypen med FDM i PLA riktas sämre än ljudet för referensen. Nedan presenteras DI för referenshögtalaren och prototyperna, se tabell 6.3.

**Tabell 6.3. DI för prototyper av fästet vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,72	4,52	8,12	9,93	11,56
MJP	1,71	4,45	8,10	9,86	11,38
FDM i PLA	1,92	4,01	8,17	9,51	11,36

DI för prototyperna liknar DI för referensen. För prototypen med FDM i PLA visas större avvikelser från referensen än vad som visas för prototypen med MJP. Nedan visas täckningsvinklar för referenshögtalare och prototyperna, se tabell 6.4.

**Tabell 6.4. Täckningsvinklar för prototyper av fästet vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	125°	65°	40°	21°
MJP	360°	123°	65°	40°	21°
FDM i PLA	360°	170°	63°	38°	19°

Täckningsvinklarna för prototypen med MJP och referensen överensstämmer väl och har samma vinklar för alla frekvenser med undantag för 1 kHz. Prototypen med FDM i PLA är också lik referensen men med större avvikelser än för MJP. Vid frekvensen 1 kHz skiljer sig dock prototypen med FDM i PLA mycket från referensen. Här har prototypen en täckningsvinkel som är 45° större än referensens.

#### 6.4.4 Lyssningstest

Prototyperna av fästet för högtalaren av metall jämfördes med referensen. Då prototypen med MJP jämfördes upplevdes ett dovre och burkigare ljud jämfört med referensens ljud. Även prototypen med FDM upplevdes mindre klar än referensen. Skillnaden mellan de två prototyperna var knapp märkbar. Den lilla skillnaden som kunde urskiljas var att prototypen med FDM i PLA var något burkigare än prototypen med MJP.

## 6.5 Sammanfattande resultat för fäste till högtalarelement

FDM i PLA är den metod med lägst kostnad och kortast tillverkningstid. Den metod som hanterar komplexa former bäst är MJP. FDM i PLA uppfyllde inte kravet om att hantera komplexa former då utskriften inte blev tillräckligt precisa och stödmaterialet var svårt att avlägsna.

För fästet av hornet av plast efterliknar prototypen med MJP referensens akustiska egenskaper väl. För fästet av hornet av metall skiljer sig båda metoderna från referensen. Prototypen med MJP är mer lik referensen än vad prototypen med FDM i PLA är. Av de två testade metoderna visas MJP vara den bäst lämpade metoden för fästet av både plast och metall. Resultaten kommer diskuteras vidare i senare kapitel.

# 7 Diskussion

*I detta kapitel diskuteras tillverkningsprocessen för de olika prototypmetoderna. Vidare diskuteras också resultatet för de akustiska mätningar som gjorts. Slutligen diskuteras projektets metodik och felkällor till resultatet.*

## 7.1 Prototyp tillverkning

Vid tillverkning av prototyper identifierades olika för- och nackdelar. De handgjorda prototyperna uppfyllde endast kraven om låg tillverkningskostnad och lättillgänglighet. De andra uppsatta kraven uppfylldes inte av dessa prototypmetoder. Dessa ansågs därför inte lämpliga att använda som prototypmetoder för utveckling av hornhögtalare.

De additivt tillverkade prototyperna var bättre lämpade. Att använda MJP som prototypmetod visade sig vara fördelaktigt då komplexa former med små detaljer skulle tillverkas jämfört med FDM. Den metod av de additivt tillverkade som hanterade komplexa former sämst var FDM i PLA. Även för utskrift av delar med tunnare vägg tjocklek var MJP bäst lämpad. Samtliga metoder som testades var lättillgängliga. En stor fördel med båda metoderna med FDM var att prototyperna kunde skrivas ut som hela delar. Ska större delar skrivas ut har dock skrivarna som använts för dessa metoder begränsningar i dimensioner vilket gör att prototyperna hade behövt delas upp likt de gjordes för MJP.

Tillverkningstiden för de olika metoderna skilde sig något från varandra. Den metod som hade snabbast utskriftstid var FDM i PLA med lagertjocklek 0,4 millimeter och den metoden med längst utskriftstid var FDM i PA med kolfiber. FDM i PLA med lagertjocklek 0,1 millimeter hade längre utskriftstid än både FDM i PLA med lagertjocklek 0,4 millimeter och MJP. FDM i PLA var också den metod som hade den lägsta kostnaden jämfört med de andra metoderna. Den dyraste av de testade metoderna var MJP.

En nackdel med additiv tillverkning för att göra prototyper av till exempel formgjutna och pressade delar är att dessa inte är designade enligt riktlinjer för additiv tillverkning. Detta kan leda till att mycket stödmaterial måste användas för att kunna skriva ut delarna. Stödmaterialet som används kan också behöva läggas på ställen i detaljerna där det är svårt att avlägsna. Detta är särskilt ett problem för

metoderna med FDM då stödmaterialet sitter hårdare ihop med de utskrivna detaljerna vilket kan leda till att detaljerna kan gå sönder då stödmaterialet avlägsnas. För MJP användes också mycket stödmaterial men att avlägsna stödmaterialet gjordes utan svårigheter då detta löses upp för att tas bort.

Alla ytbehandlingar som testades hade en låg kostnad och var snabba att utföra. Ytbehandlingarna med lack var smidigare och enklare än de andra ytbehandlingarna som testades.

## 7.2 Prototypernas akustiska egenskaper

### 7.2.1 Handgjorda prototyper

Resultaten för akustikmätningarna som gjorts visar att de handgjorda prototyperna inte efterliknar referensen. Spridningsdiagrammen visade asymmetrisk spridning och frekvenssvaren lägre ljudnivå än referensen. Detta resultat är rimligt då prototypernas form och yta avviker mycket från referenshögtalarens.

### 7.2.2 Additivt tillverkade prototyper

#### 7.2.2.1 Efterlikning av högtalare av plast och metall

De additivt tillverkade prototyperna visades alla replikera referenshögtalaren av plast väl. Detta gällde för samtliga uppmätta akustiska egenskaper. För referenshögtalaren av metall replikerade prototyperna referensen sämre. Detta gällde särskilt vid de lägre frekvenserna. De additivt tillverkade prototyperna som testats är alla tillverkade i plast vilket kan vara en anledning till att de replikerar referenshögtalaren av plast bättre. På grund av detta hade det varit intressant att undersöka additiv tillverkning med metall för att se om en sådan prototyp hade replikerat metallhornet bättre. De additiva tillverkningsmetoderna med metall som har undersökts har dock en hög kostnad vilket gjorde de sämre lämpade som prototypmetoder och därför behövde uteslutas. Om additiv tillverkning med metall skulle testas hade metoder med lägre kostnad behövt användas.

Att prototyperna inte efterliknade de akustiska egenskaperna för högtalaren av metall precis utesluter inte dessa metoder i en potentiell utvecklingsprocess. Om metoderna som testats hade visats ha ett konsekvent beteende och ge lika avvikelser för fler referenshögtalare hade metoderna varit relevanta att använda för att göra jämförande tester. Metoderna kan då ge indikationer på till exempel vilka former som bidrar till bättre akustiska egenskaper.

#### 7.2.2.2 Skillnader mellan prototypmetoder för högtalare av plast och metall

I resultatet för horn av plast visades det också att samtliga additivt tillverkade prototyper beter sig likt varandra. Detta var dock inte fallet för prototyperna för hornet av metall där olik beteende visades mellan prototyperna. Varför metoderna skiljer sig åt för den ena högtalaren men inte för den andra är utifrån testerna som gjorts svårt att verifiera men en anledning kan vara att referenshögtalarnas konstruktion gör högtalarna olika styva. Referenshögtalaren av plast har en tjockare väggjocklek än högtalaren av metall. För att undersöka om detta var anledningen till skillnaderna testades olika väggjocklekar för prototyperna för hornet av metall. Detta visades dock inte ha någon påverkan på resultatet och är därmed troligen inte anledningen till att resultaten skiljer sig åt. En annan faktor som gör att referenshögtalarnas styvhet differentierar är formen av hornen. Formen av hornen kan alltså ha gjort att metoderna skiljer sig olika mycket från varandra för de olika referenshögtalarna men eftersom endast två referenshögtalare testats är denna slutsats svår att dra.

#### 7.2.2.3 Variationer i frekvenssvar

I resultatet visades det att vissa prototyper hade ett jämnare frekvenssvar som var mer likt referensen gällande variationer mellan frekvenserna. Andra prototyper visade ett mer ojämnt frekvenssvar men med toppar där ljudnivån var mer lik referensens ljudnivå. Exempel på detta visas för frekvenser mellan 400–1 000 Hz för högtalaren av metall där MJP och FDM i PA med kolfiber har mer lik ljudnivå som referensen än vad FDM i PLA har, se figur 5.29 i avsnitt 5.4.1.1. Trots att MJP och FDM i PA med kolfiber har mer variationer i ljudnivå mellan frekvenser i detta intervall är den genomsnittliga ljudnivån för dessa mer lik referensens vilket gör dessa till en bättre efterlikning av referenshögtalaren.

#### 7.2.2.4 Luft mellan utskriftslagren

I resultatet för hornet av metall kan, som tidigare nämnt, likheter ses mellan MJP och FDM i PA med kolfiber. Dessa skiljer sig dock från FDM i PLA. Vad detta beror på kan utifrån de tester som gjorts inte säkerställas. Dock kan luft mellan utskriftslagren ha påverkan på resultatet. Mer luft mellan lagerna minskar densiteten och försämrar prototypens styvhet vilket gör att materialegenskaperna för prototypen inte längre överensstämmer med materialegenskaperna för det rena utskriftsmaterialet. Lägre densitet och styvhet gör att ljudvågorna reflekteras sämre och lägre ljudnivå kan mätas upp för vissa frekvenser. För de additivt tillverkade prototyperna för högtalaren av metall kan detta samband visas i frekvenssvaret. FDM i PLA med 0,4 millimeters utskriftslager visades ha den lägsta ljudnivån och är också den metod med sämst sammansmälta utskriftslager vilket tyder på mer luft mellan lagren. I ett försök att minska luft mellan lagren testades FDM i PLA med ett utskriftslager på 0,1 millimeter. Sammansmältning för denna prototyp var bättre än för den med utskriftslager på 0,4 millimeter men lagerna kan fortfarande tydligt



urskiljas. I resultatet för frekvenssvaret visas endast en liten förbättring för de högre frekvenserna för prototypen med 0,1 millimeters utskriftslager.

FDM i PA med kolfiber har också utskriftslager på 0,1 millimeter men prototyperna visar att dessa har finare sammansmältning mellan lagren än vad FDM i PLA har. Detta beror sannolikt på de olika 3D-skrivarna som använts för de två metoderna. Att FDM i PA med kolfiber har finare sammansmältning av utskriftslagerna innebär troligen mindre luft mellan lagerna. Detta kan vara en anledning till att denna metod efterliknar referensens frekvenssvar bättre än vad FDM i PLA gör trots att PA med kolfiber har lägre densitet och styvhet än vad PLA har.

MJP skriver ut delar där lagerna inte är synliga utan helt sammansmälta. Trots att FDM i PA med kolfiber troligt har mer luft mellan lagren än MJP visar dessa metoder lika akustiska egenskaper. En potentiell anledning till detta är att materialet som användes för utskrift med MJP har lägre densitet och styvhet än vad PA med kolfiber har. Densiteten påverkar materialets specifika akustiska impedans vilken har en påverkan på ljudets reflektion i och mellan materialen.

#### *7.2.2.5 Skillnad mellan låga och höga frekvenser*

I resultatet visas det att prototyperna för hornet av metall replikerar referensen sämre vid låga frekvenser jämfört med vid högre. Detta kan förklaras med den akustiska impedansen. Som tidigare nämnt ökar hornet den akustiska impedansen i luften nära högtalarelementet vilket ökar effektiviteten för överföringen av ljudvågor. Detta gäller särskilt för de låga frekvenserna eftersom våglängden av dessa är stora i förhållande till högtalarelementets storlek. De tillverkade prototyperna har högst troligt lägre specifik akustisk impedans än vad hornet av metall har vilket gör att ljudvågorna transmitteras mer genom prototypernas väggar jämfört med vad de gör genom referenshornets. Detta kan leda till att den akustiska impedansen i luften nära högtalarelementet blir lägre för prototyperna och impedansmatchningen mellan högtalarelementet och luften blir sämre. Att prototyperna inte ökar den akustiska impedansen nära högtalarelementet lika mycket som referenshornet gör är en trolig anledning till att prototyperna är mindre effektiva för låga frekvenser.

#### **7.2.3 Ytornas påverkan på resultatet**

Resultaten visar att skillnaden mellan de flesta ytbehandlade prototyperna och de obehandlade är liten. Undantaget är prototyperna som är ytbehandlade med metallack och aluminiumfolie. Att ytbehandlingarna med spackel och slipning inte visat några större förbättringar för resultatet kan betyda att ojämnheter i ytan av denna storlek inte påverkar ljudets reflektion i hornen. Resultatet är rimligt då ljudvågornas storlek är flera gånger större än ojämnheterna i ytan. Med detta som resultat är skillnaden i ytjämnhet för de olika additivt tillverkade prototyperna troligen inte anledningen till att de akustiska egenskaperna för prototyperna skiljer sig åt från referenshögtalaren av metall.

Som visades i resultatet replikerade prototypen i aluminiumfolie referensen sämre än vad den obehandlade gjorde. Vad detta beror på kan utifrån testerna som gjorts inte säkerställas men en potentiell anledning kan vara att luftfack uppstod mellan folie och prototypen då folie limmades på ytan. Luft bakom folie gjorde ytan mindre styv på vissa ställen i prototypen vilket kan ha påverkat ljudvågornas reflektion.

Metallack visades förbättra prototyperna så att dessa efterliknade referenshögtalaren av metall bättre. Lacket bestod av 99,5 procent aluminium vilket är av samma material som referenshögtalaren. Detta har troligt bidragit till att prototypernas materialegenskaper efterliknar referenshögtalaren av metall bättre och därmed ger mer lika akustiska egenskaper.

#### **7.2.4 Horndelarnas inverkan**

Som visades i resultatet påverkade både inner- och ytterdelen av hornet de akustiska egenskaperna, men ytterdelen påverkade mest. Eftersom denna undersökning endast gjordes med en prototypmetod och för en referenshögtalare är det dock svårt att dra slutsatser kring om detta beteende är konsekvent för flera högtalare. Med resultatet som visades hade det ändå varit intressant att kombinera olika prototypmetoder för inner- och ytterdel. Eftersom ytterdelen hade störst påverkan kan högre prioritet läggas på att hitta en metod för denna som bättre replikerar hornet av metall. Innerdelen visade inte lika stora skillnader vilket tyder på att metoden för denna inte behöver vara lika prioriterad.

#### **7.2.5 Samband mellan frekvenssvar och THD**

Ett nära samband visas mellan graferna för frekvenssvar och THD. En låg ljudnivå i frekvenssvaret implicerar ofta högre andel uppmätta störningar vid samma frekvens. Detta beror på att THD mäts som andel störningar i förhållande till ljudnivån av grundfrekvensen. Sambandet är synligt för många av de resultat som har presenterats.

#### **7.2.6 Spridningsdiagram**

Spridningsdiagrammen visar endast data för ett fåtal utvalda frekvenser och inte det kontinuerliga frekvensområdet. Detta gör att resultaten som presenteras i diagrammen kan vara missvisande. Trots detta kan diagrammen vara bra för att upptäcka mönster mellan prototyper och referenshögtalare. Ett exempel är diagrammen för de handgjorda prototyperna där spridningen visas ojämn och icke-centrerad. För de additiv tillverkade prototyperna kan många likheter med referensen utläsas i diagrammen.

### 7.2.7 Lyssningstest

Att utföra lyssningstest var ett komplement till akustikmätningar då det möjliggjorde observation av egenskaper i ljudkvalitén som inte visas i graferna. För några prototyper upplevdes ett klarare ljud jämfört med referenshögtalaren. Detta betyder inte att prototypen är bra som metod eftersom syftet var att ge likt ljud som referensen.

Vid testerna var det svårt att avgöra skillnader mellan prototyper och referenshögtalare. Detta kan betyda att skillnaderna var små men kan också bero på att personerna som lyssnade hade otillräcklig erfarenhet av dessa test och därmed svårt att veta vad som skulle observeras. På grund av detta togs resultaten från lyssningstesterna inte i beaktning då rekommendationer om prototypmetoder för framtida utveckling gavs. Om fler personer, med mer erfarenhet, deltog i lyssningstesterna hade resultatet kunnat bli mer tillförlitligt.

Som tidigare nämnt utfördes lyssningstester där personerna som lyssnade var medvetna om vilken prototyp som ljudet tillhörde. Detta kan ha gjort att upplevelsen av ljudet kan ha påverkats av förutfattade åsikter om prototyperna. För att göra testerna mer tillförlitliga hade testerna kunnat utföras som blindtest. Alltså att personerna som lyssnade inte visste vilka prototyper ljudfilerna tillhörde. Tillförlitligheten hade också kunnat öka om det säkerställdes att personerna beskrev ljudfilerna likadant vid upprepande tillfällen.

### 7.2.8 Fäste till högtalarelement

För resultaten av prototyperna för fästena visades skillnader mellan prototyper och referens av metall. För fästet av plast var prototyperna lika referensen. Prototyperna med FDM i PLA replikerade referenserna sämre än vad prototyperna med MJP gjorde. Detta resultat är rimligt eftersom FDM i PLA hanterade komplexa formerna sämre än MJP.

Vid de låga frekvenserna efterliknade frekvenssvaret för prototypen med MJP referensen av metall väl. Större skillnader visades mellan prototypen och referensen vid de högre frekvenserna. Då faspluggen ingick som en del av prototypen för fästet av metall kan en möjlig anledning till lägre ljudnivå hos prototypen vara faspluggens inverkan på de höga frekvenserna. Att samma resultat inte visades för prototyperna av fästet av plast kan bero på att denna referenshögtalare inte hade någon fasplugg.

Att prototyperna skiljer sig från referensen av metall kan också bero på andra faktorer. En anledning kan vara att monteringen av högtalarelementen i prototyperna inte var lika robust som monteringen i referensen. En annan anledning kan vara om prototyperna inte ökar den akustiska impedansen i luften nära högtalarelementen lika mycket som referensen gör.

## 7.3 Metodik

### 7.3.1 Utvecklingsmetodik

Att använda Double Diamond som metod var bra då den tillät ett fritt och iterativt arbetssätt. Att kunna iterera fram nya lösningar var speciellt viktigt i denna undersökning eftersom det under projektets gång framkom resultat som bidrog till nya idéer till förbättringar av metoderna. Detta gällde framför allt prototyperna för hornet av metall. För dessa prototyper utfördes många iterationer mellan faserna utveckla och leverera för att förbättra prototypmetoderna.

### 7.3.2 Mätningar

Att göra mätningar enligt standard IEC 60268–5 var en bra metod för att undersöka prototypernas akustiska egenskaper. Att följa en standard gör att resultaten, nu och i framtiden, kan jämföras med andra liknande mätningar på ett likvärdigt sätt och att mätningarna som gjorts enklare kan reproduceras. Tydliga riktlinjer för mätningarna gjorde också att samtliga mätningar, utan svårigheter, kunde utföras likt varandra. Utrustningen som fanns tillgänglig gjorde det enkelt att följa standardens riktlinjer.

## 7.4 Felkällor

Eftersom digitala modeller av referenshögtalarna inte fanns tillgängliga skapades egna. Att skapa dessa modeller var nödvändigt för att utföra projektet men är inte en del av en eventuell utvecklingsprocess för hornhögtalare. För att eliminera påverkan på resultatet utfördes detta steg med mycket hög noggrannhet. Detta gjorde att inga synliga skillnader kunde urskiljas mellan prototypernas och referenshögtalarnas geometrier. Trots detta innebär steget en risk i att modellen avviker från referensen vilket har kunnat påverka resultatet.

Prototypernas akustiska egenskaper mättes med samma utrustning och på samma plats men vid olika tillfällen. För varje tillfälle ställdes mätutrustningen upp på liknande sätt med noggrann positionering. Trots detta finns en risk att variationer i uppställningen kan ha uppstått vilka kan ha bidragit till skillnader i mätresultatet. Mätutrustningen som användes kan också ha påverkat resultatet. Ett exempel på detta är om mikrofonen omkalibrerats mellan mättillfällena.

En annan felkälla kan vara tillförlitligheten hos de additiva tillverkningsmetoderna. Som tidigare nämnt undersöktes tillförlitligheten för FDM i PLA genom att tillverka och jämföra två prototyper med varandra. Resultaten var nästan identiska vilket

tyder på stor tillförlitlighet. Hade fler prototyper jämförts hade tillförlitligheten stärkts ytterligare. Skrivarna som användes för de andra metoderna är mer avancerade än den som användes för FDM i PLA vilket tyder på att tillförlitligheten hos dessa borde vara högre än hos FDM i PLA.

## 8 Slutsats

*I detta kapitel presenteras de slutsatser som dragits.*

Projektet har bidragit till slutsatser som kan vara betydelsefulla vid framtida utveckling av hornhögtalare. Dessa presenteras nedan.

- Att tillverka prototyper som ska efterlikna ett horn av plast är möjligt med flera olika additiva tillverkningsmetoder. Dessa metoder bidrar till prototyper som väl efterliknar geometrin och de akustiska egenskaperna av en tillverkad hornhögtalare.
- Att tillverka prototyper som ska efterlikna ett horn av metall har visats svårt med additiv tillverkning med plast. De akustiska egenskaperna för de additivt tillverkade prototyperna är sämre än de akustiska egenskaperna för en tillverkad hornhögtalare.
- Att ytbehandla prototyper visas sällan påverka de akustiska egenskaperna. En yta med små ojämnheter har inte resulterat i förändringar av de akustiska egenskaperna. En ytbehandling som visats förbättra de akustiska egenskaperna för prototyper av horn av metall är att spraya prototypen med metallack.
- För att utveckla en ny högtalare av plast anses FDM i PLA med 0,4 millimeters höjd på utskriftslagrena vara en lämplig prototypmetod för horn delarna. Detta då denna har en låg kostnad, kort tillverkningstid, kan skriva ut prototypdelar som hela delar och efterliknar de akustiska egenskaperna av en tillverkad högtalare av plast väl.
- För utveckling av en ny högtalare av metall rekommenderas det att vidare undersökning av prototypmetoder görs. Utifrån de metoder som har undersökts anses FDM i PA med kolfiber, ytbehandlad med metallack, vara den bäst lämpade metoden för horn delarna. Detta då metoden har en låg kostnad, kan skriva ut prototypdelar som hela delar och skapar prototyper med akustiska egenskaperna som är i närheten av de akustiska egenskaperna hos en tillverkad högtalare.
- MJP anses vara den bäst lämpade prototypmetoden för fästen till högtalarelement då denna metod hanterar komplexa former väl. Dock

behöver fler metoder undersökas för att hitta en bättre lämpad prototypmetod för fästen av metall.

## 9 Framtida arbete

*I detta kapitel presenteras förslag på framtida arbete.*

I detta projekt användes endast två högtalare som referens. För att kunna dra fler och mer omfattande slutsatser kring metoderna borde ytterligare referenshögtalare testas. Möjligheten att få tillgång till fler referenshögtalare med redan befintliga tillhörande digitala modeller undersöktes utan resultat. Därför rekommenderas det att egna digitala modeller tas fram av fler referenshögtalare. Referenshögtalarna bör väljas med olika form, storlek och material. Genom att göra detta kan det säkrare konstateras om metoderna är tillämpbara för olika typer av hornhögtalare.

I en vidare undersökning rekommenderas även att fler prototypmetoder testas. Eftersom resultaten för högtalaren av metall visade att prototyperna skilde sig från referensen hade det varit meningsfullt att undersöka om andra metoder kan användas för att bättre replikera ett metallhorn. Ett exempel på en sådan metod hade varit additiv tillverkning med metall eller annat styvt material med hög densitet. De metoder som har undersökts för additiv tillverkning med metall har haft en hög kostnad vilket gjort att de inte varit lämpliga som metoder. I en vidare undersökning är det därför viktigt att undersöka om det finns liknande metoder med lägre kostnad. Även metoder som förhindrar luft mellan utskriftslagren hade varit relevant att undersöka vidare för att replikera horn av metall.

För att utveckla en högtalare av metall hade det också varit relevant att undersöka FDM i PA med kolfiber närmare då denna visades vara den bäst lämpade prototypmetoden. Metoden rekommenderas därför att testas för fler referenshögtalare med olika former. Genom att göra denna undersökning kan det visas om metoden ger ett konsekvent beteende för olika referenser. En metod med konsekventa avvikelser kan vara användbar i en utvecklingsprocess eftersom dessa avvikelser kan kompenseras för vid analyser och metoden enkelt kan användas vid jämförande tester.

För att förbättra prototyperna med FDM i PA med kolfiber för referenshögtalaren av metall kan vägg tjockleken på ytterhornet ökas. Geometrin för hornets innerdel gör det svårt att ändra vägg tjockleken på denna. En tjockare vägg tjocklek tillåter ren kolfiberförstärkning i prototypen vilket ökar prototypens styvhet. Denna ändring är relevant för att se om prototypen kan efterlikna referensen bättre.

Eftersom ytbehandling med metallack visades förbättra prototyperna av hornet av metall rekommenderas vidare undersökning av fler ytbehandlingar med metall. Ett förslag är att undersöka möjligheten att täcka prototyperna med metall genom



galvanisering. Detta är till exempel möjligt om prototyperna först målas med ledande färg.

Det rekommenderas också att fler prototypmetoder för fästen till högtalarelement undersöks. Eftersom fästena har komplexa geometrier föreslås att metoderna som testas är additiva tillverkningsmetoder. Metoderna bör också ge robusta detaljer som håller högtalarelementet stabilt på plats i fästet. En metod som rekommenderas för detta är FDM i PA med kolfiber. Ytbehandling med metallack föreslås också testas för prototyperna av fästet av metall då detta visades ha positiv inverkan på resultatet för prototyperna av horndelarna.

För att bygga prototyper av en hel hornhögtalare är det relevant att undersöka samtliga ingående delar. Mellan horndelarna och högtalarelementet finns, som tidigare nämnt, tätningsringar. I en vidare undersökning rekommenderas det att kolla närmare på tätningsringarnas inverkan på de akustiska egenskaperna och undersöka lämpliga prototypmetoder för dessa. Tätningsringarna är tillverkade av ett gummiliknande material och prototypmetoderna som testas för dessa bör efterlikna egenskaperna av detta material.

# Referenslista

- [1] Design Council. (2015). What is the framework for innovation? Design Council's evolved Double Diamond. Hämtad 24 januari 2022 från <https://www.designcouncil.org.uk/news-opinion/what-framework-innovation-design-councils-evolved-double-diamond>
- [2] Baker, J. (2021). Audio: Doubling power vs doubling output. Hämtad 8 april 2022 från [https://eu.celsusice.co.uk/blog/post/doubling-power-vs-doubling-output?\\_\\_store=euwebsite&\\_\\_from\\_store=default](https://eu.celsusice.co.uk/blog/post/doubling-power-vs-doubling-output?__store=euwebsite&__from_store=default)
- [3] Ljud. (2022). Hämtad 17 februari 2022 från <https://www-ne-se.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/ljud>
- [4] Ljudhastighet. (2022). Hämtad 17 februari 2022 från <http://www-ne-se.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/ljudhastighet>
- [5] Sayin, U. & Guasch, O. (2013). Directivity control and efficiency of parametric loudspeakers with horns. *Journal of the Acoustical Society of America*, 151(4), 153-157. <https://doi.org/10.1121/1.4812446>
- [6] Biot, M. A. (1957). Reflection on a rough surface from an acoustic point source. *Journal of the Acoustical Society of America*, 29(11), 1193-1200. <https://doi.org/10.1121/1.1908741>
- [7] Sound - Impedance. (2020). Hämtad 12 februari 2022 från <https://delphipages.live/sv/vetenskap/fysik/materie-energi/impedance>
- [8] Ingelstam, E., Rönngren, R. & Sjöberg, S. (2014). *TEFYMA* (3. uppl.). Lund, Sverige: Studentlitteratur.
- [9] Nilsson, E., Johansson, A-C., Brunskog, J., Sjökvist L-G. & Holmberg, D. (2005). Grundläggande akustik. Hämtad 17 maj 2022 från [https://www.akustik.lth.se/fileadmin/tekniskakustik/education/2020\\_VTAF01/SE-LTH-grundlaggande-akustik.pdf](https://www.akustik.lth.se/fileadmin/tekniskakustik/education/2020_VTAF01/SE-LTH-grundlaggande-akustik.pdf)
- [10] THD (Total Harmonic Distortion) of speakers: this is what you should know. (u.å.). Hämtad 17 februari 2022 från <https://www.monacor.com/magazine/total-harmonic-distortion>
- [11] Lindblad, A. (2013). *Byggguide för högtalare* (Examensarbete, avdelning för information- och mediateknik, Arcada, Helsingfors, Finland). Hämtad 3 mars 2022 från [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63325/Lindblad\\_Alexander.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63325/Lindblad_Alexander.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [12] Kolbrek, B. (2008). Horn theory: An introduction, Part 1. *AudioXpress*, 1–9. Hämtad 12 februari 2022 från <https://www.grc.com/acoustics/an-introduction-to-horn-theory.pdf>

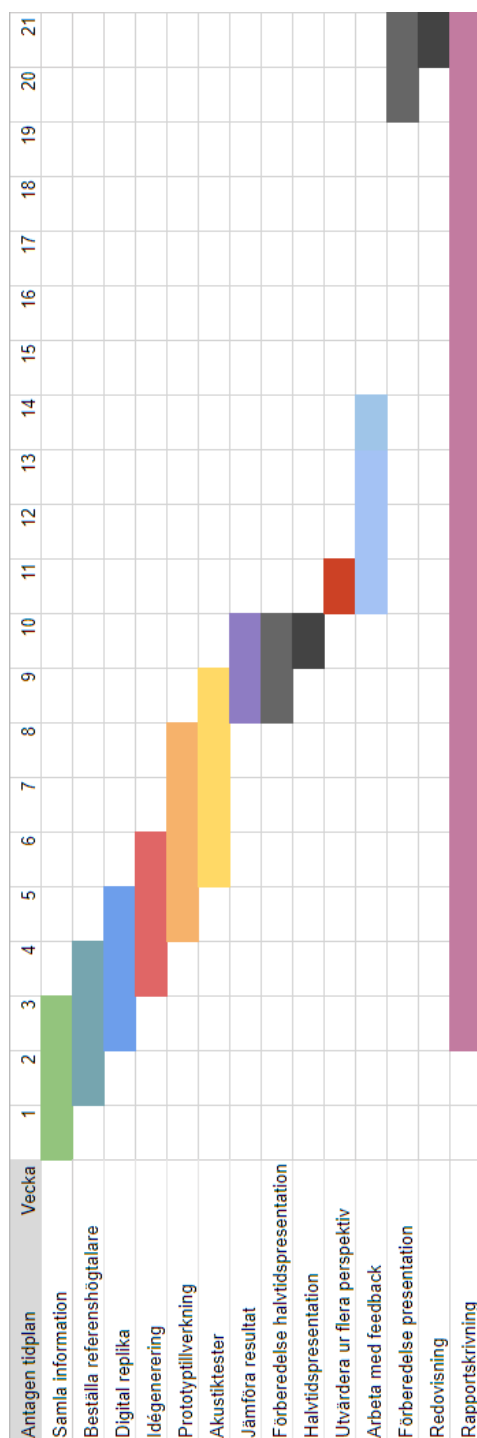
- [13] Högtalaren, så fungerar den. (u.å.). Hämtad 17 februari från <https://www.hifiklubben.se/inspiration/stereohifi/hogtalaren-1-sa-fungerar-den/>
- [14] Nathan, J. (1998). *Back to Basics Audio*. Butterworth-Heinemann.
- [15] Interferens. (2022). Hämtad 22 april 2022 från <https://www-nese.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%C3%A5ng/interferens>
- [16] Bali, S.P. (2007). *Consumer Electronics*. New Delhi, Indien: Dorling Kindersley.
- [17] Gavin, B. (2018). What are woofers, mid-range speakers and tweeters?. Hämtad 18 februari 2022 från <https://www.howtogeek.com/354985/what-are-woofers-mid-range-speakers-and-tweeters/>
- [18] Category:Horns (loudspeakers). (2022). Hämtad 24 maj 2022 från [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Horns\\_\(loudspeakers\)](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Horns_(loudspeakers))
- [19] Hughes, C. (2015). Understanding horn directivity control. *AudioXpress*. Hämtad 2 februari 2022 från <https://audioxpress.com/article/Understanding-Horn-Directivity-Control>
- [20] Hvidlykke, J. (2016). Passiva eller aktiva högtalare. Hämtad 18 februari 2022 från <https://www.ljudochbild.se/nyheter/teknik/passiva-eller-aktiva-hogtalare/>
- [21] Equalization & alignment (EQA). (u.å.). Hämtad 18 februari 2022 från <https://www.klippel.de/products/qc-system/modules/eqa-equalization-alignment.html>
- [22] International Electrotechnical Commission (IEC). (2003). *Sound system equipment - Part 5: Loudspeakers (IEC 60268-5)*. Genève, Schweiz: International Electrotechnical Commission (IEC).
- [23] Completely eco-free room. (u.å.). Hämtad 23 februari 2022 från <http://www.iac-nordic.se/produkter/akustikavdelning/ekofritt-rum/helt-ekofritt-rum>
- [24] What are 3D printed materials and how are they used?. (u.å.). Hämtad 18 februari 2022 från <https://www.makerbot.com/stories/design/3d-printing-materials/>
- [25] Bhuvanesh Kumar, M. & Sathiya, P. (2020). Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. *Thin-Walled Structures*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228>
- [26] Design Rules for 3D Printing. (2018). Hämtad 18 februari 2022 från <https://www.core77.com/posts/74401/Design-Rules-for-3D-Printing>
- [27] Kenik, D. (2019). The effect of layer height and extrusion width on stiffness of 3D printed parts. Hämtad 28 februari 2022 från <https://www.tetonsim.com/blog/post/the-effect-of-layer-height-and-extrusion-width-on-stiffness-of-3d-printed-parts>
- [28] What is multijet printing (MJP)?. (2022). Hämtad 12 februari 2022 från <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-multijet-printing-mjp>
- [29] Material jetting. (2020). Hämtad 12 februari 2022 från <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-jetting/>

- [30] Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS). (2021). Hämtad 8 april 2022 från <http://polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/ABS.html>
- [31] Nyman, J., instruktör vid ID-A verkstaden, institutionen för designvetenskaper, Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet, Lund, Sverige. (2022, 8 mars). Personlig kommunikation.
- [32] Elektroplätning. (2022). Hämtad 30 mars 2022 från <https://www-nese.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%C3%A5ng/elektropl%C3%A4tering>
- [33] Galvanisering. (2022). Hämtad 30 mars 2022 från <https://www-nese.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%C3%A5ng/galvanisering>
- [34] Kristiansson, M. (2016). Så fungerar 3d-scanning. Hämtad 12 februari 2022 från <https://3dp.se/2016/08/24/sa-fungerar-3d-scanning/>
- [35] GOM. (2017). ATOS Triple Scan. Hämtad 18 februari 2022 från [http://spectromas.ro/wp-content/uploads/2018/07/GOM\\_Brochure\\_ATOS\\_TripleScan\\_EN.pdf](http://spectromas.ro/wp-content/uploads/2018/07/GOM_Brochure_ATOS_TripleScan_EN.pdf)
- [36] PrimaValue PLA. (2022). Hämtad 7 april 2022 från [https://cdn.shopify.com/s/files/1/2424/8853/files/Prima\\_Produktblad\\_Value-PLA.pdf?301](https://cdn.shopify.com/s/files/1/2424/8853/files/Prima_Produktblad_Value-PLA.pdf?301)
- [37] Markforged. (2021). Composites. Hämtad 30 mars 2022 från <http://static.markforged.com/downloads/composites-data-sheet.pdf>
- [38] 3D Systems. (2020). Material selection guide for ProJet® MJP 2500 and 2500 Plus. Hämtad 30 mars 2022 från <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2020-08/3d-systems-visiJet-m2-material-selection-guide-a4-us-2020-08-20-web.pdf>
- [39] International Organization for Standardization (ISO). (2012). *Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms.* (ISO 3745:2012). Genève, Schweiz: International Organization for Standardization (ISO).

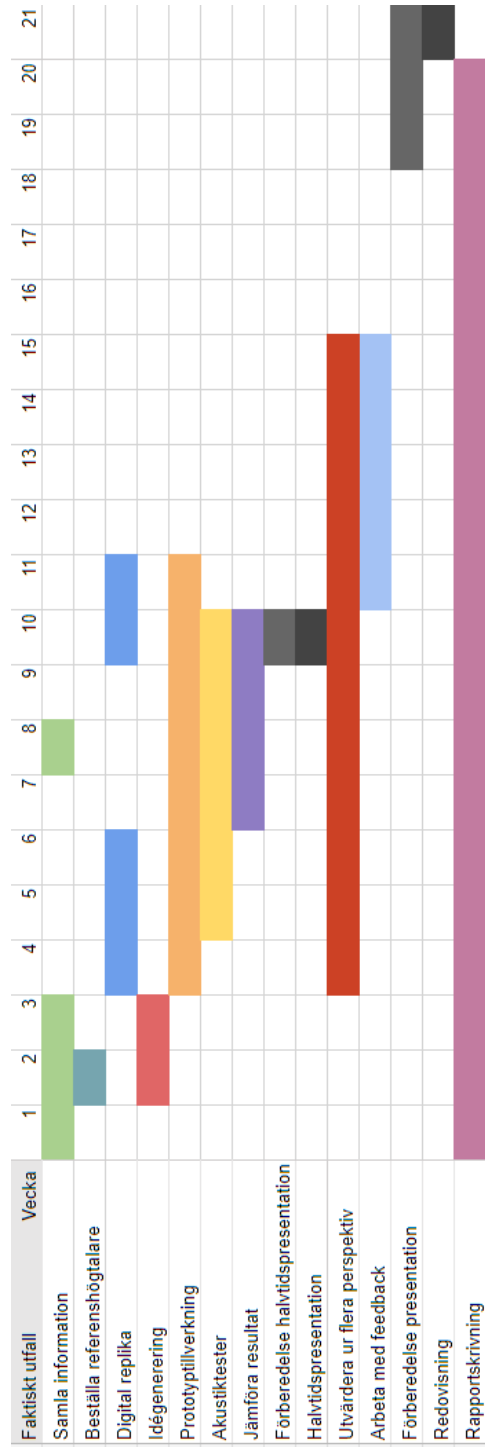
# Bilaga A Tidplan

*I denna bilaga presenteras den antagna tidplanen och projektets faktiska utfall. Skillnader mellan dessa diskuteras.*

I figur A.1 nedan visas projektets antagna tidplan och i figur A.2 visas projektets faktiska utfall. Figureerna visar skillnader mellan tidplanen och utfallet i olika delar av projektet. Som visas i det faktiska utfallet utfördes steget att skapa digital replika i två omgångar. Anledningen till detta var att projektet delades upp i två delar, den första att undersöka prototypmetoder för horndelar och den andra att undersöka prototypmetoder för fästen till högtalarelement. Det visas även att prototyp tillverkning och akustiktestning tog längre tid än planerat. Anledningen till detta var att de iterativa stegen tog längre tid och att utvärderingen av metoderna utfördes parallellt. Utvärderingen pågick under majoriteten av veckorna för projektet vilket visas i figuren för det faktiska utfallet. I slutet av den antagna tidplanen var tid avsatt för att arbeta med den återkoppling som framkom under halvtidspresentationen som hölls på Axis. Denna avsatta tid var värdefull då det tillät arbete med förbättring av prototyperna inom den antagna tidplanen.



Figur A.1 Projektets antagna tidplan.



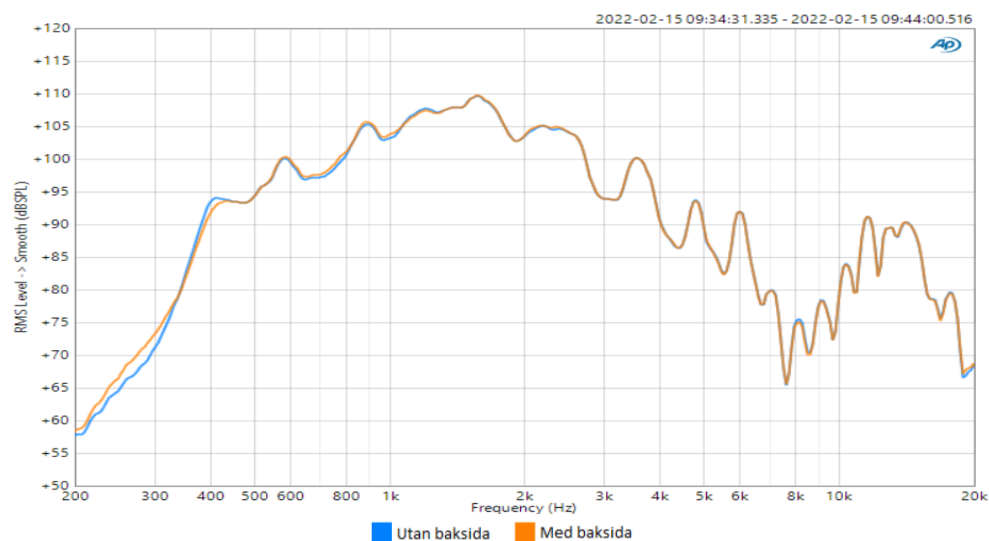
Figur A.2. Projektets faktiska utfall.

# Bilaga B Högtalare utan baksida

I denna bilaga presenteras spridningsdiagram för högtalare 1 med och utan baksida. Även tabeller innehållande data för DI och täckningsvinklar presenteras.

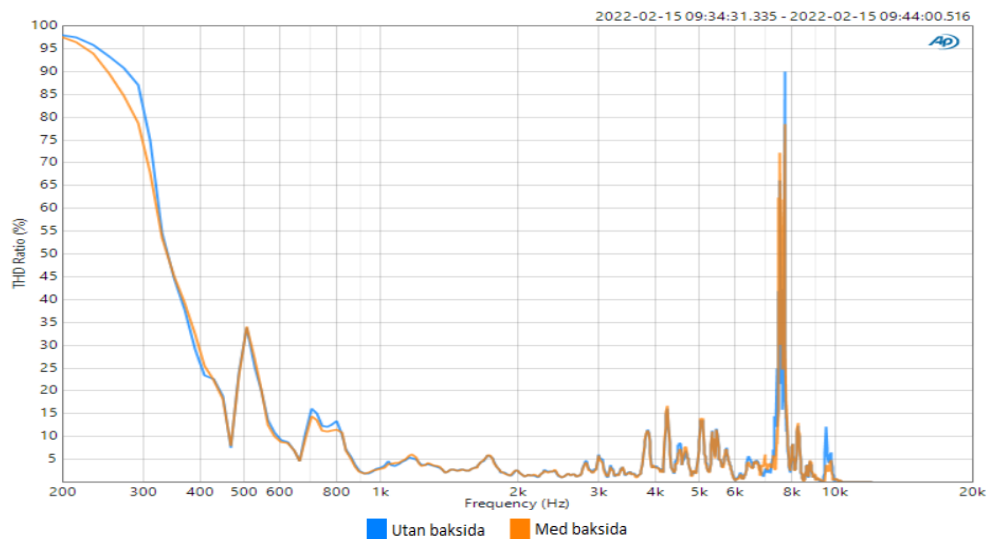
## B.1 Mätresultat

Resultatet för akustikmätningarna för högtalare 1 med och utan baksida visas nedan, frekvenssvar i figur B.1 och THD i figur B.2. Den orangea kurvan i figurerna nedan representerar högtalaren med baksida och den blå kurvan representerar högtalaren utan.



Figur B.1. Frekvenssvar för högtalare med och utan baksida.

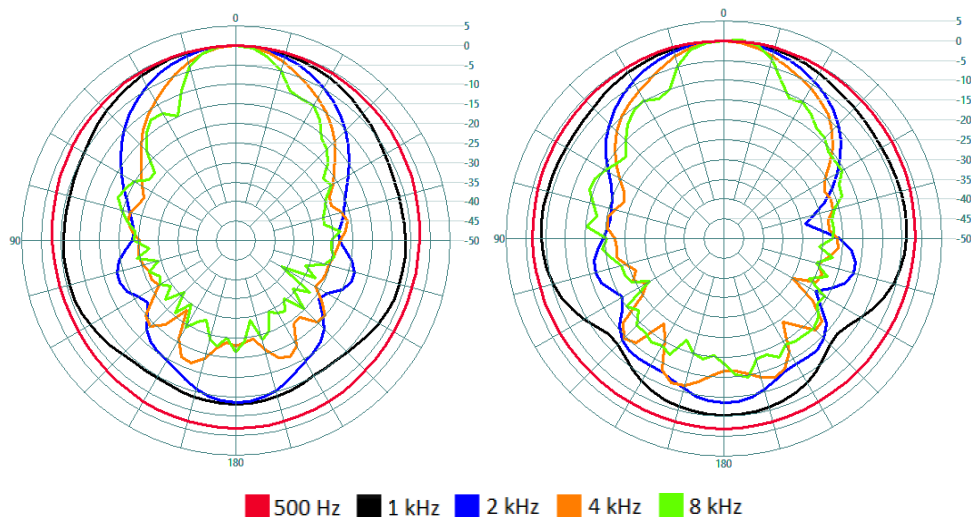




**Figur B.2. THD för högtalare med och utan baksida.**

I figurerna syns det att både frekvenssvaret och THD är likt för högtalaren med och högtalaren utan baksida.

Nedan visas spridningsdiagram för högtalaren med respektive utan baksida. Se figur B.3.



**Figur B.3. Spridningsdiagram för högtalare med baksida visas till vänster och utan baksida visas till höger.**

I diagrammen syns små skillnader för de två högtalarna. För frekvenser över 4 kHz visar högtalaren utan baksida en högre relativ ljudnivå vid högtalarens bakre öppning. Ljudet riktas alltså inte lika bra som för högtalaren med baksida. Nedan

presenteras DI och täckningsvinkel för högtalaren med och utan baksida, se tabell B.1 och B.2.

**Tabell B.1. DI för högtalare med och utan baksida vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Med baksida	1,78	4,44	7,55	9,26	10,29
Utan baksida	1,33	3,92	7,29	8,62	9,51

Som kan avläsas i tabellen har högtalaren utan baksida något lägre DI jämfört med högtalaren med baksida för samtliga utvalda frekvenser.

**Tabell B.2. Täckningsvinklar för högtalare med och utan baksida vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Med baksida	360°	173°	69°	48°	33°
Utan baksida	360°	214°	72°	55°	34°

Även täckningsvinklarna visar motsvarande resultat. Högtalaren utan baksida har något större täckningsvinkel än högtalaren med baksida.

## B.2 Slutsats

Mätningarna visade att frekvenssvar och THD var lika för högtalaren med och utan baksida men att små skillnader visades i spridning. På grund av likheterna beslutades det att prototyperna för högtalare 1 kunde mätas utan baksida och för att minska skillnaderna i spridning mellan referens och prototyper mättes även referensen utan baksida.

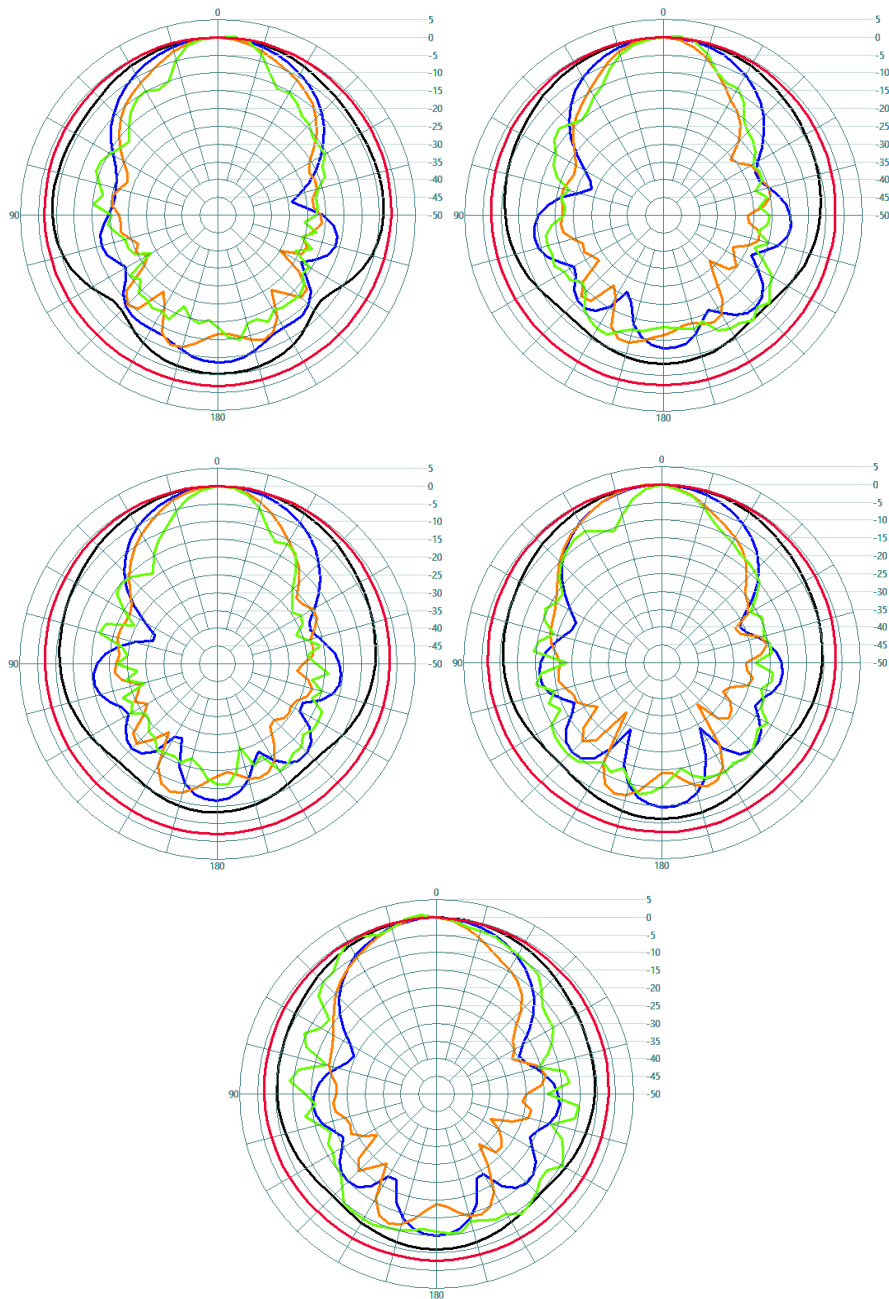
# Bilaga C Spridningsmönster

*I denna bilaga presenteras spridningsdiagram för ytbehandlade prototyper och additivt tillverkade prototyper med justeringar i vägg tjocklek och höjd på utskriftslager. Även tabeller innehållande data för DI och täckningsvinklar för dessa prototyper presenteras.*

## C.1 Spridningsmönster för horn av plast

### **C.1.1 Ytbehandling**

#### *C.1.1.1 Lack*



**Figur C.1. Spridningsdiagram för additivt tillverkade prototyper. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar obehandlad prototyp med MJP, diagrammet i mitten till vänster visar klarlackad prototyp med MJP, diagrammet i mitten till höger visar obehandlad prototyp med FDM i PLA och nedre visar klarlackad prototyp med FDM i PLA.**

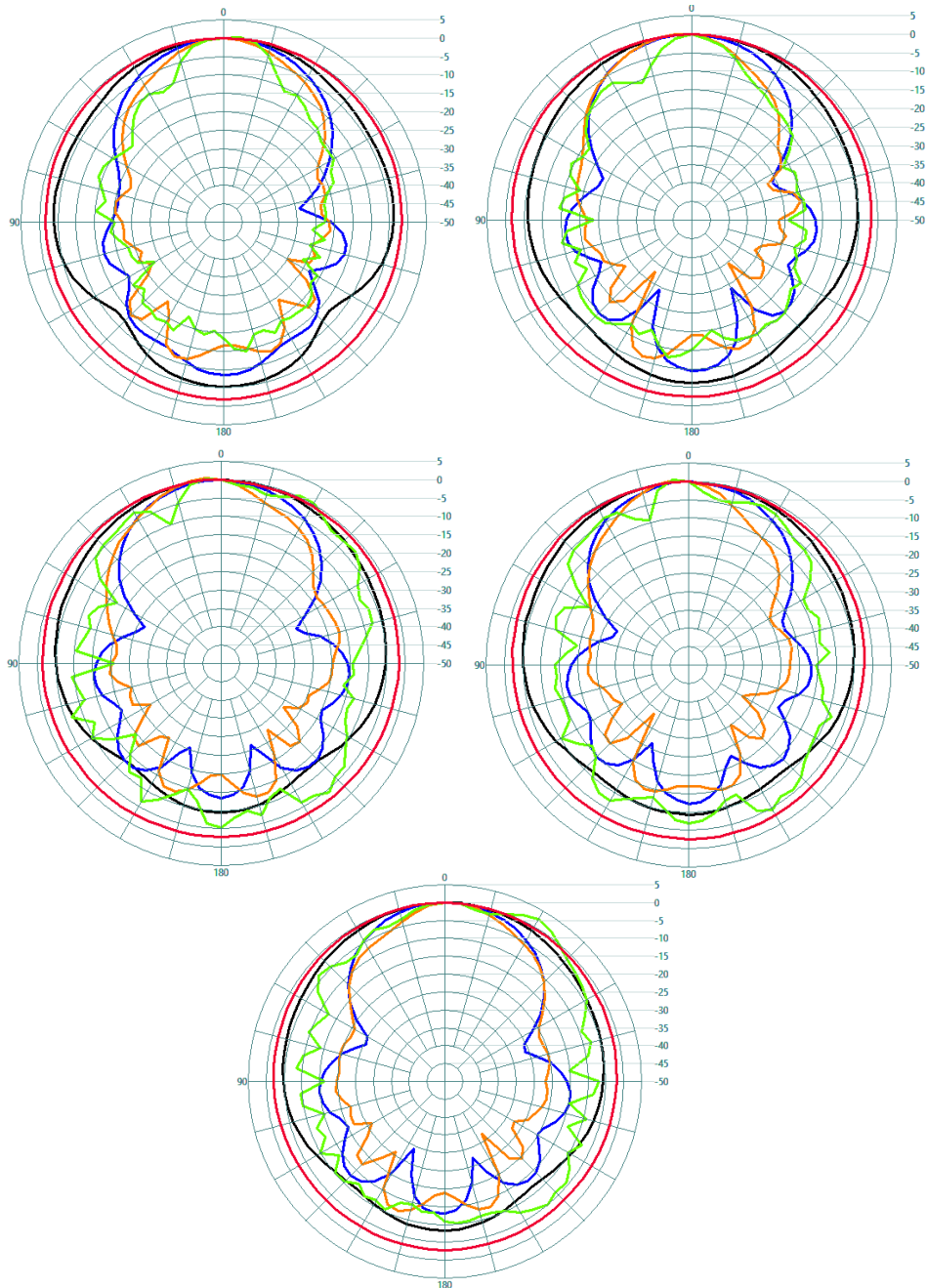
**Tabell C.1. DI för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,3	3,92	7,29	8,62	9,51
Obehandlad MJP	1,66	4,53	7,91	9,6	9,19
Klarlackad MJP	1,48	4,44	7,85	9,24	10,35
Obehandlad FDM i PLA	1,47	4,19	7,78	8,62	9,8
Klarlackad FDM i PLA	1,66	4,18	7,83	8,8	6,5

**Tabell C.2. Täckningsvinklar för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	214°	72°	55°	34°
Obehandlad MJP	360°	168°	66°	41°	38°
Klarlackad MJP	360°	175°	67°	46°	32°
Obehandlad FDM i PLA	360°	186°	67°	54°	30°
Klarlackad FDM i PLA	360°	193°	66°	52°	87°

### C.1.1.2 Spackel



**Figur C.2. Spridningsdiagram för ytbehandlade prototyper med FDM i PLA. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar obehandlad prototyp med FDM, diagrammet i mitten till vänster visar spacklad prototyp, diagrammet i mitten till höger visar spacklad och slipad prototyp och nedre visar spacklad, slipad och klarlackad prototyp.**

**Tabell C.3. DI för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,3	3,92	7,29	8,62	9,51
Obehandlad FDM i PLA	1,47	4,19	7,78	8,62	9,8
Spackel	1,47	4,29	7,8	8,38	5,65
Spackel och slip	1,78	4,22	7,87	9,15	6,97
Spackel, slip och lack	1,67	4,17	7,76	8,69	5,08

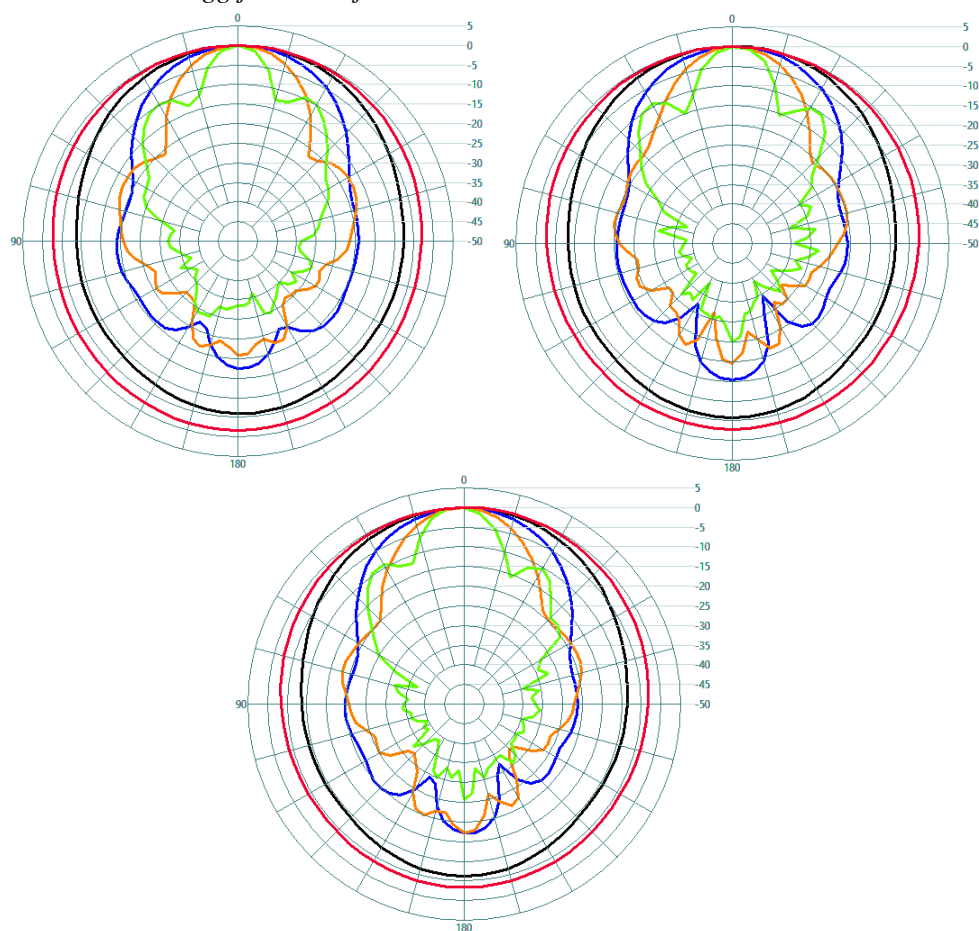
**Tabell C.4. Täckningsvinklar för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	214°	72°	55°	34°
Obehandlad FDM i PLA	360°	186°	67°	54°	30°
Spackel	360°	198°	68°	57°	75°
Spackel och slip	360°	201°	68°	45°	60°
Spackel, slip och lack	360°	198°	68°	54°	97°

## C.2 Spridningsmönster för horn av metall

### C.2.1 Additivt tillverkade prototyper

#### C.2.1.1 Olika vägg tjocklekar för FDM i PLA



**Figur C.3. Spridningsdiagram för olika vägg tjocklekar för prototyper med FDM i PLA. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar prototyp med två millimeters vägg tjocklek och nedre visar prototyp med tre millimeters vägg tjocklek.**



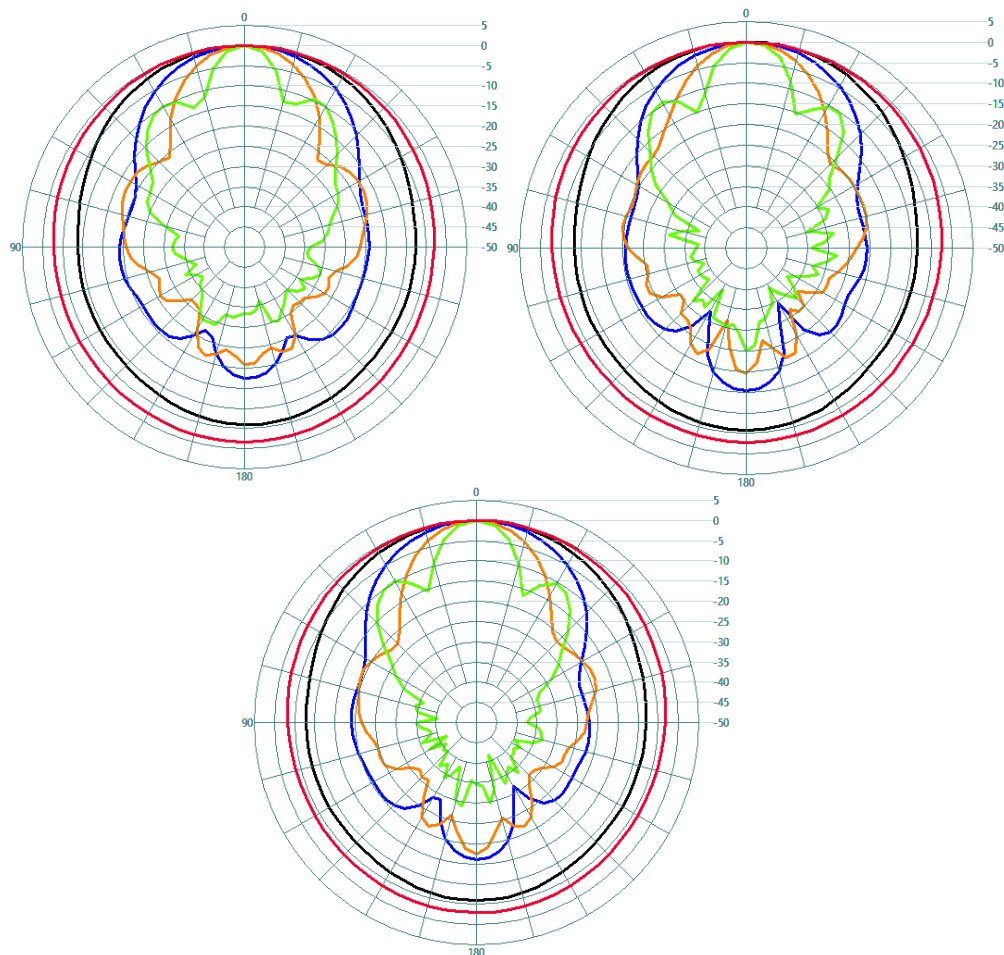
**Tabell C.5. DI för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,72	4,52	8,12	9,93	11,56
2 mm	1,92	4,45	8,16	9,98	11,3
3 mm	2,23	4,67	8,18	9,83	11,0

**Tabell C.6. Täckningsvinklar för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	125°	65°	40°	21°
2 mm	360°	123°	64°	39°	24°
3 mm	360°	124°	64°	40°	26°

### C.2.1.2 Olika höjder på utskriftslager för FDM i PLA



**Figur C.4.** Spridningsdiagram för olika höjd på utskriftslagrena för prototyper med FDM i PLA. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar prototyp med 0,4 millimeters höjd på utskriftslagrena och nedre visar prototyp med 0,1 millimeters höjd på utskriftslagrena.

**Tabell C.7.** DI för prototyper vid olika frekvenser.

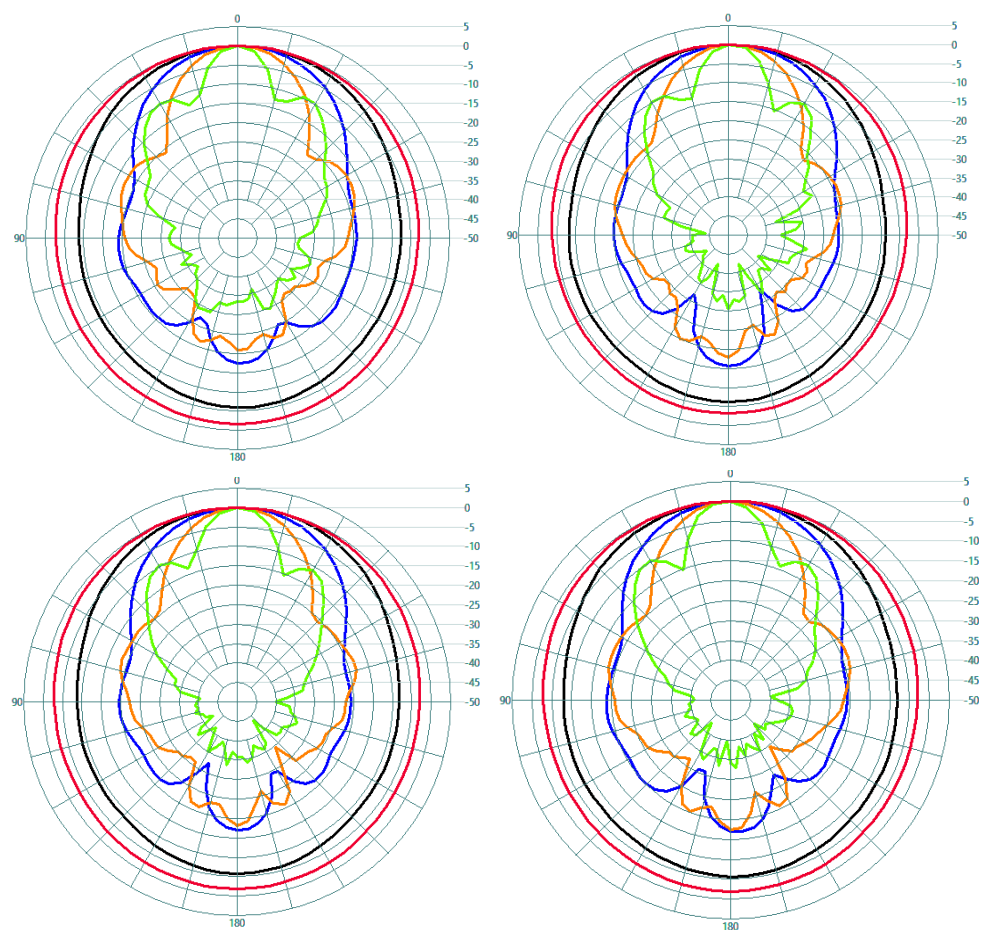
Prototyp	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Referens	1,72	4,52	8,12	9,93	11,56
0,1 mm	2,13	4,48	8,11	10,03	11,31
0,4 mm	1,92	4,45	8,16	9,98	11,3

**Tabell C.8. Täckningsvinklar för prototyper vid olika frekvenser.**

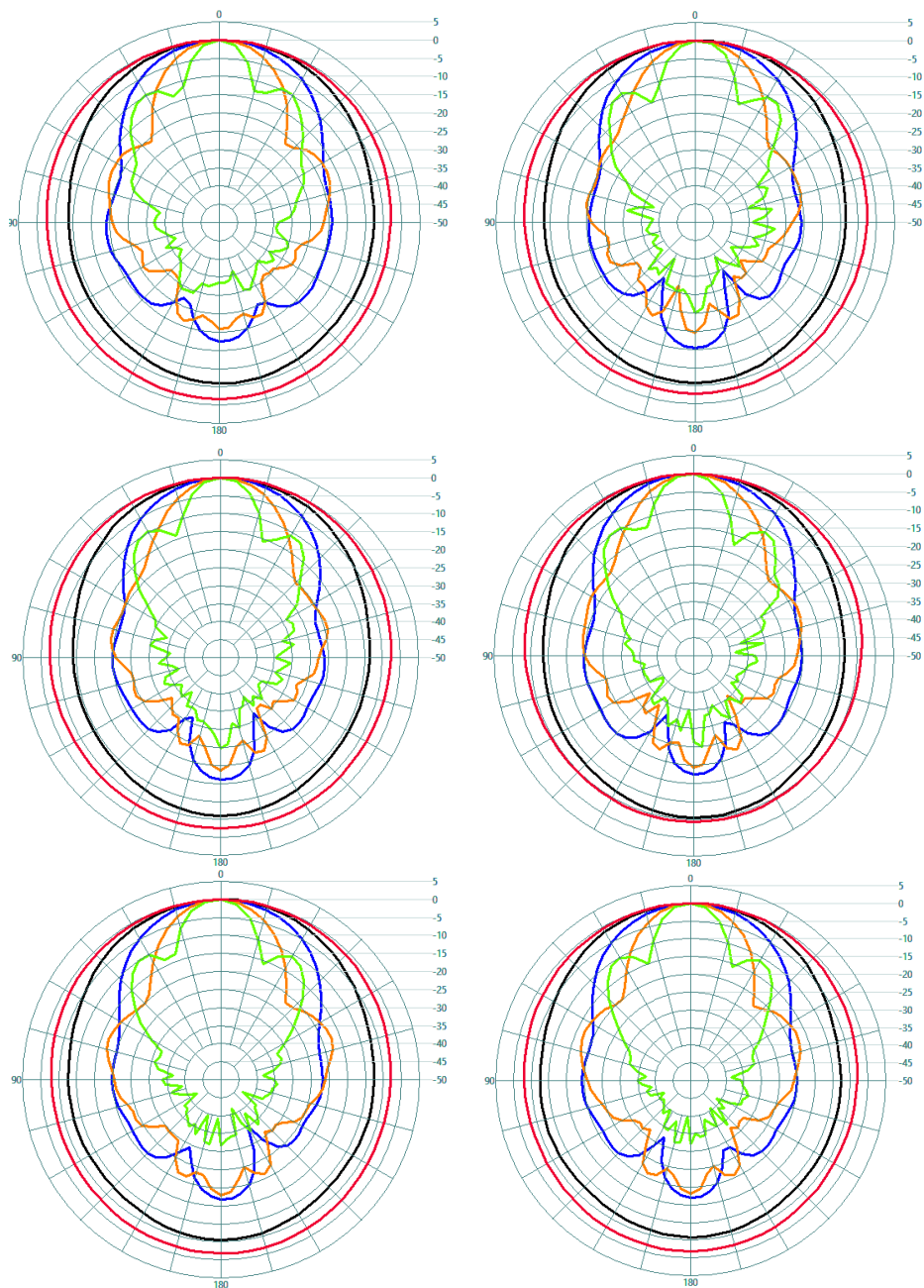
<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	125°	65°	40°	21°
0,1 mm	360°	125°	65°	39°	24°
0,4 mm	360°	123°	64°	39°	24°

## C.2.2 Ytbehandling

### C.2.2.1 Lack



**Figur C.5. Spridningsdiagram för ytbehandlade prototyper tillverkade med MJP. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar obehandlad prototyp, nedre vänstra visar klarlackad prototyp och nedre högra visar metallackad prototyp.**



**Figur C.6. Spridningsdiagram för ytbehandlade prototyper tillverkade med FDM. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar obehandlad prototyp med FDM i PLA, vänstra diagrammet i mitten visar klarlackad prototyp med FDM i PLA och högra diagrammet i mitten visar metallackad FDM i PLA. Nedre vänstra visar obehandlad prototyp med FDM i PA med kolfiber och nedre högra visar metallackad prototyp med FDM i PA med kolfiber.**

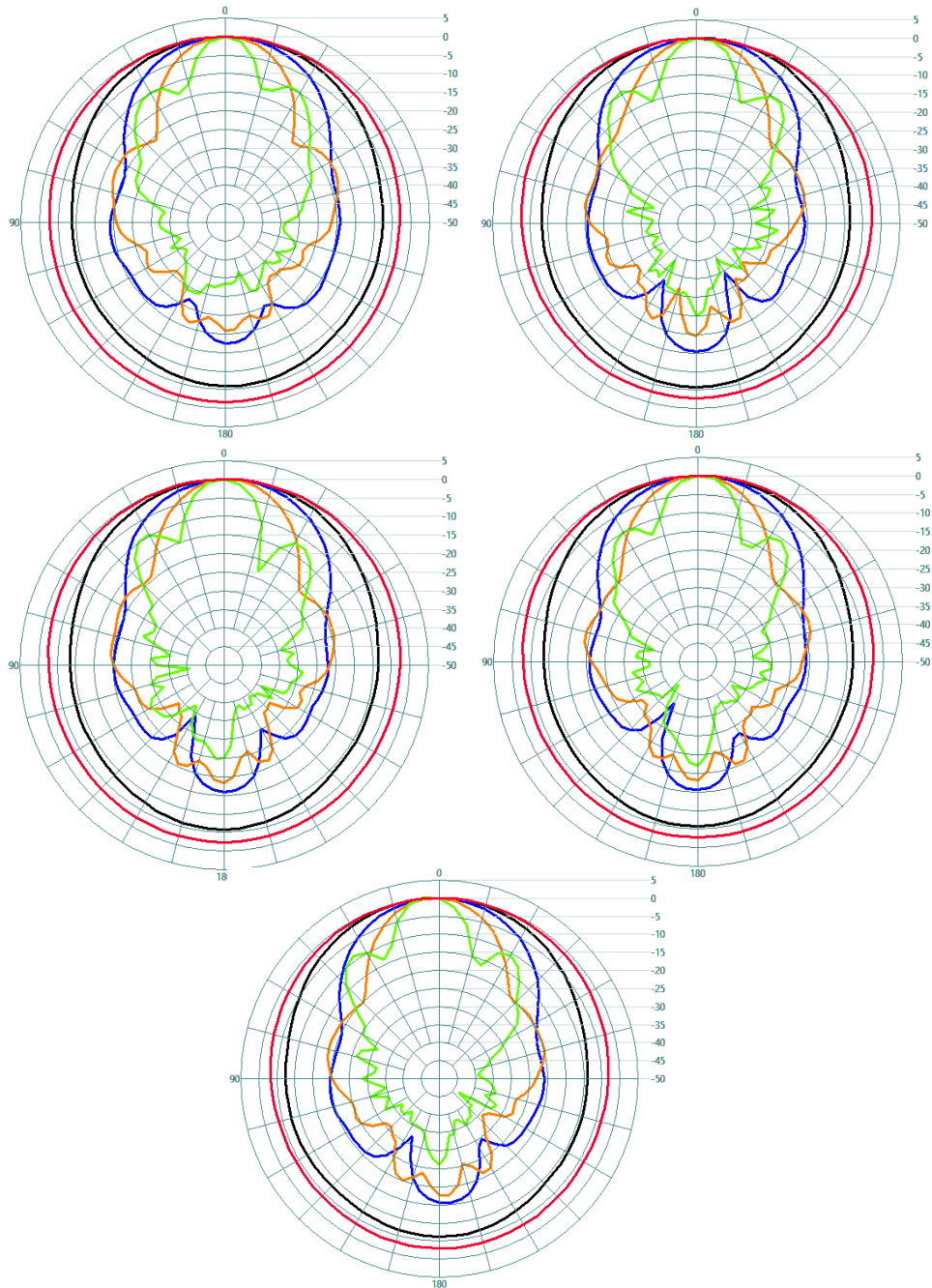
**Tabell C.9. DI för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,72	4,52	8,12	9,93	11,56
Obehandlad MJP	1,66	4,53	7,91	9,6	9,19
Klarlackad MJP	1,75	4,58	8,12	9,9	11,32
Metallackad MJP	1,78	4,48	8,14	9,92	11,30
Obehandlad FDM i PLA	1,92	4,45	8,16	9,98	11,3
Klarlackad FDM i PLA	1,74	4,71	8,14	9,97	11,26
Metallackad FDM i PLA	2,57	4,55	8,12	9,89	11,22
Obehandlad FDM i PA med kolfiber	1,77	4,40	8,11	10,02	11,11
Metallackad FDM i PA med kolfiber	1,81	4,42	8,11	10,02	11,38

**Tabell C.10. Täckningsvinklar för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	125°	65°	40°	21°
Obehandlad MJP	360°	168°	66°	41°	38°
Klarlackad MJP	360°	121°	65°	40°	24°
Metallackad MJP	360°	120°	65°	40°	24°
Obehandlad FDM i PLA	360°	123°	64°	39°	24°
Klarlackad FDM i PLA	360°	121°	65°	39°	24°
Metallackad FDM i PLA	360°	119°	65°	40°	25°
Obehandlad FDM i PA med kolfiber	360°	126°	66°	38°	26°
Metallackad FDM i PA med kolfiber	360°	124°	65°	38°	24°

### C.2.2.2 Spackel



**Figur C.7. Spridningsdiagram för ytbehandlade prototyper med FDM i PLA. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar obehandlad prototyp, diagrammet i mitten till vänster visar spacklad prototyp, diagrammet i mitten till höger visar spacklad och slipad prototyp och nedre visar spacklad, slipad och klarlackad prototyp.**

**Tabell C.11. DI för prototyper vid olika frekvenser.**

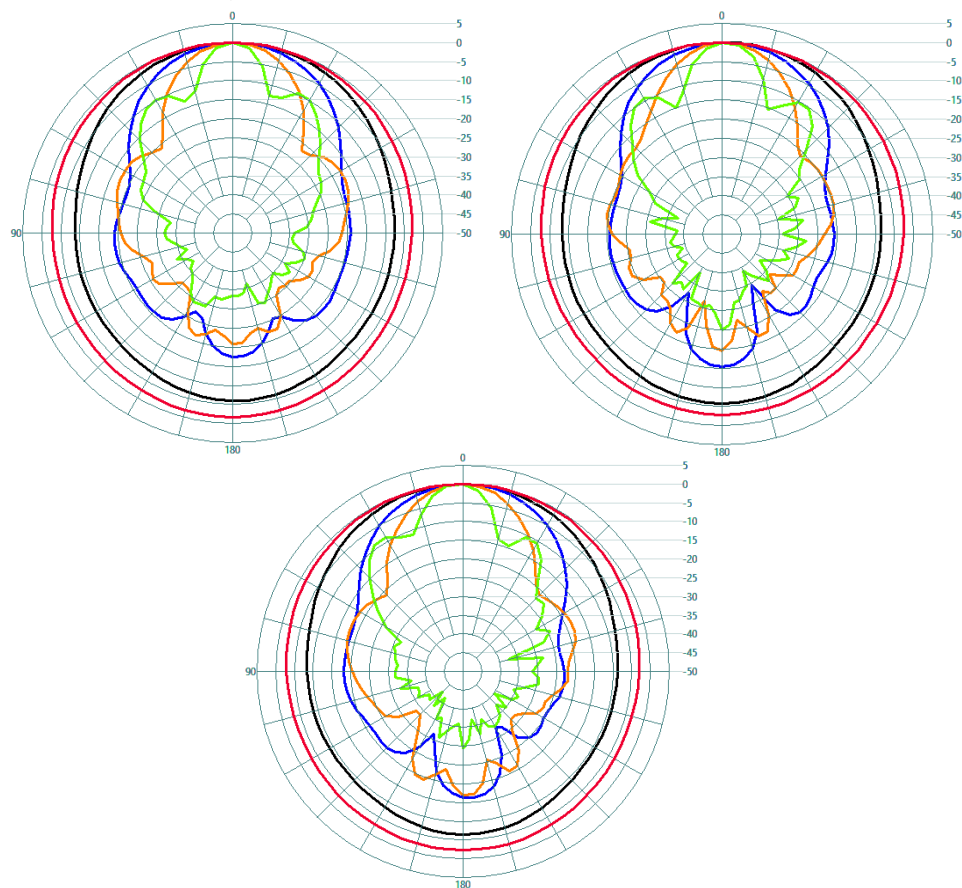
<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,72	4,52	8,12	9,93	11,56
Obehandlad FDM i PLA	1,92	4,45	8,16	9,98	11,3
Spackel	1,77	4,26	8,10	9,87	11,39
Spackel och slip	1,91	4,55	8,09	9,84	11,24
Spackel, slip och lack	2,13	4,54	8,08	9,82	10,93

**Tabell C.12. Täckningsvinklar för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	125°	65°	40°	21°
Obehandlad FDM i PLA	360°	123°	64°	39°	24°
Spackel	360°	121°	65°	40°	24°
Spackel och slip	360°	123°	65°	41°	25°
Spackel, slip och lack	360°	123°	65°	41°	25°



### C.2.2.3 Aluminiumfolie



**Figur C.8. Spridningsdiagram för ytbehandlad prototyp med FDM i PLA i aluminiumfolie. Övre vänstra diagrammet visar referensen, övre högra visar obehandlad prototyp och nedre visar aluminiumfolieklädd prototyp.**

**Tabell C.13. DI för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	1,72	4,52	8,12	9,93	11,56
Obehandlad FDM i PLA	1,92	4,45	8,16	9,98	11,3
Aluminiumfolie	1,87	4,73	8,14	9,84	11,17

**Tabell C.14. Täckningsvinklar för prototyper vid olika frekvenser.**

<i>Prototyp</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1 kHz</i>	<i>2 kHz</i>	<i>4 kHz</i>	<i>8 kHz</i>
Referens	360°	125°	65°	40°	21°
Obehandlad FDM i PLA	360°	123°	64°	39°	24°
Aluminiumfolie	360°	121°	65°	41°	24°